ANÁLISIS DE LA ENTROPÍA EN LA SECUENCIACIÓN DE PRODUCCIÓN POR REPROCESOS EN AMBIENTES FLOW SHOP: ESTUDIO DE CASO CELDA DE MANUFACTURA HAS 200

LIZETH ELIANA GARCÍA RUIZ – CÓDIGO: 062121055
PAULA JULIANA MIRANDA GUALDRÓN – CÓDIGO: 062121097

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ D.C
2017

ANÁLISIS DE LA ENTROPÍA EN LA SECUENCIACIÓN DE PRODUCCIÓN POR REPROCESOS EN AMBIENTES FLOW SHOP: ESTUDIO DE CASO CELDA DE MANUFACTURA HAS 200

LIZETH ELIANA GARCÍA RUIZ – CÓDIGO: 062121055
PAULA JULIANA MIRANDA GUALDRÓN – CÓDIGO: O62121097

Proyecto de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingenieras Industriales

DIRECTOR
ING. EDGAR LEONARDO DUARTE FORERO

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ D.C
2017

Nota de aceptación

El trabajo de grado titulado Análisis de la entropía en la secuenciación de producción por reprocesos en ambientes flow shop: estudio de caso celda de manufactura has 200, realizado por las estudiantes Lizeth Eliana García Ruiz y Paula Juliana Miranda Gualdrón con códigos 062121055 y 062121097 respectivamente, cumple con todos los requisitos legales exigidos por la Universidad Libre para optar al título de Ingeniero Industrial.

Director de proyecto

Jurado 1

Jurado 2

Bogotá D.C., diciembre de 2017

Dedicatoria

En primer lugar a mi hermana mayor Karen Alejandra, que siempre ha sido mi ejemplo a seguir para la construcción de mi vida profesional y quien me ha ayudado a formar principios de responsabilidad y deseos de superación. En ella tengo un espejo en el cual me quiero reflejar, su inteligencia, virtudes y grandes logros alcanzados me llevan a admirarla cada día más.

A mi Padre, Madre y Hermano por su apoyo incondicional durante estos años de estudios, impulsándome a seguir adelante y perseverar para cumplir mis objetivos

A todas las personas que participaron en el desarrollo de este proyecto, por aportar con su tiempo, dedicación, conocimientos y puntos de vista, en especial la participación del Ingeniero Edgar Duarte por su constante apoyo y direccionamiento en el desarrollo de este proyecto y con quien formamos un lazo de amistad

Por último, a mis compañeras Lizeth García y Erika Higuera, con quienes he compartido experiencias inolvidables desde primer semestre de universidad y a pesar de las dificultades presentadas a lo largo de estos años de estudio aun nos seguimos apoyando para terminar juntas esta etapa importante de nuestras vidas.

Paula Juliana.

A aquel que siempre ha estado presente en los buenos y malos momentos, que me ha enseñado a seguir adelante sin importar nada, a quien le debo mi vida y todo lo que soy, a Dios.

A mis padres por su paciencia y confianza durante este proceso, esto no hubiera sido posible sin su apoyo incondicional. A mis hermanos por siempre esperar lo mejor de mí y por creer en lo que soy, estoy orgullosa de quienes son.

A mis amigos y compañeros que estuvieron presentes a lo largo de este camino, en ocasiones dando ánimo y en otras solo molestando, todo fue parte del proceso y sé que nada hubiera sido igual sin su compañía, Miguel Garzón, Andrea Navarro, Paula Miranda y Erika Higuera, ha sido un placer compartir un pedacito de vida a su lado.

Por último, a “Abba, se trata de ti” el camino siempre será más sencillo cuando hay gente en tu vida que te hace feliz.

Lizeth Eliana

Agradecimientos

Primero y como más importante agradecemos a Dios, quien estuvo presente a lo largo de este camino apoyando cada paso de este proceso.

A nuestro asesor de proyecto de grado el Ingeniero Edgar Duarte. Sus conocimientos, forma de trabajar, persistencia y paciencia han sido fundamentales para la culminación de este trabajo. Un docente de admirar que ha inculcado en nosotras un sentido de seriedad y responsabilidad académica. A él, gracias totales por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha llevado el desarrollo de este proyecto.

Agradecemos a la Universidad Libre por habernos permitido ser parte de su familia educativa, abriéndonos sus puertas para poder estudiar nuestra carrera universitaria. De igual manera agradecemos a todos los docentes con los cuales tuvimos oportunidad de compartir cátedras, ya que nos brindaron todos sus conocimientos para formarnos como futuras profesionales.

Por último agradecemos a los Ingenieros Manuel Camacho y Ever Fuentes, quienes nos han apoyado a lo largo del proceso con sus correcciones y comentarios necesarios para el mejoramiento de este trabajo.

Paula Juliana Miranda Gualdrón
Lizeth Eliana García Ruiz

RESUMEN

Con el propósito de hacer uso de las herramientas que brinda la Universidad Libre a la comunidad académica, el presente trabajo investigativo fue desarrollado en el laboratorio de la celda de manufactura Has-200 con el que cuenta la Universidad desde el año 2006; de allí que el objetivo de este trabajo consistió en la realización de un análisis de la entropía generada en una secuencia de producción causada por productos defectuosos, esto aplicado a sistemas de producción flow shop automatizados. Para la realización de dicho análisis se tuvo como base la selección de una estructura de reproceso que permitiera reducir en la celda de manufactura el grado de desorden ocasionado en una secuencia de producción al momento de aparecer productos defectuosos dentro del proceso. Para lograr lo anterior, se realizó una simulación en la cual se diseñaron los procesos realizados en la celda de manufactura a fin de poder agregar las estructuras de reproceso y así analizar la entropía generada en el sistema. Como paso previo se realizó un proceso de caracterización del objeto de estudio con el fin de identificar su modo de operación. A continuación, se procedió a seleccionar el software en el cual se trabajaría la simulación, para posterior iniciar con su diseño. Una vez terminado el montaje de diseño en el software, se realizaron corridas de producción dentro de la simulación a fin de obtener datos que posteriormente fueron analizados. Seguido, se realizó la selección de la estructura de reproceso que cumpliera con el objetivo de reducir la entropía en el sistema. Finalmente, a través de un ejemplo aplicativo, realizando un proceso de comparación entre un antes y un después de aplicar la solución propuesta, se evidencia como el problema de estudio puede impactar en los planes y programas de producción de una compañía real.

Palabras clave: Automatización, flow shop, secuenciación, entropía, productos defectuosos, simulación.

ABSTRACT

With the purpose to use the tools that Libre University offers to academic community, the present investigative work was developed in the cells manufacturing laboratory Has-200 with which the university counts since the year 2006; hence, the objective of this work was to perform an entropy analysis generated in a production sequence caused by defective products, this applied to automated flow shop production systems. In order to carry out this analysis, it was based on the selection of a reprocessing structure that would allow to reduce in the manufacturing cell the degree of disorder caused in a production sequence when defective products appear within the process. In order to achieve this, a simulation was performed in which the processes performed in the manufacturing cell were designed in order to be able to add the reprocessing structures and thus to analyze the entropy generated in the system. As a previous step, a process of characterization of the object of study was carried out in order to identify its mode of operation. Then proceeded to select the software in which the simulation would be worked, later to start with its design. Once the design assembly was completed in the software, production runs were carried out within the simulation in order to obtain data that were later analyzed. Next, the selection of the reprocessing structure was carried out that fulfilled the objective of reducing entropy in the system. Finally through an application example, performing a process of comparison between a before and after applying the proposed solution, it is evident how the study problem can impact the plans and programs of production of a real company.

Key words: Automation, flow shop, sequence, entropy, defective products, simulation

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE GRÁFICOS

ÍNDICE DE FÓRMULAS

INTRODUCCIÓN

En muchas empresas manufactureras se cuenta con situaciones donde algunos de sus productos fabricados presentan diferentes tipos de defectos, causando como resultado que el producto no cumpla con las especificaciones.

Cuando estas situaciones se presentan, las empresas pueden tomar la determinación de desechar el producto o llevar a cabo acciones correctivas para eliminar la no conformidad. Al desechar el producto las empresas corren el riesgo de presentar pérdidas de material, mayores tiempos de producción, pérdidas económicas, mayores cantidades de desperdicios etc. Por otro lado al realizar acciones correctivas, se evita la fabricación de un nuevo producto que sustituya el defectuoso, de esta manera las empresas logran un ahorro sustancial en sus costos de producción.

Este proceso de realizar acciones correctivas a los productos defectuosos tiene como nombre Reprocesos, los cuales, al igual que desechar los productos defectuosos, trae ciertos inconvenientes a las empresas al momento de su implementación, problemas como mayores tiempos de producción y entropía durante la ejecución del proceso.

La entropía es definida como un grado de desorden presentando durante la ejecución de un proceso, de esta manera durante un proceso de producción puede existir entropía en el momento en que una secuencia de trabajos se ve alterada por la presencia de productos defectuosos.

Este proyecto tiene como fin realizar un análisis a la entropía generada en un proceso de producción cuando hay presencia de productos defectuosos. Este análisis se encuentra enfocado en el funcionamiento de la celda de manufactura Has-200, herramienta con la que cuenta la Universidad Libre.

Para lograr el anterior propósito se desarrollaron los siguientes objetivos:

- Caracterizar el funcionamiento de la celda de manufactura en términos de sus componentes y procesos.
- Identificar las estructuras de reprocesamiento de productos no conformes dentro de la celda que resulten ser más adecuadas en términos de su funcionalidad, diseño y pertinencia.
- Modelar las estructuras encontradas a través de procesos de simulación que permitan explorar su impacto en la entropía y eficacia del proceso productivo.
- Determinar la mejor forma de reproceso que disminuya la entropía en la secuenciación, aplicable a la celda de manufactura, procurando mantener la eficacia del proceso.
- Proponer un esquema de relación entre los mecanismos de disminución de la entropía y las modificaciones pertinentes en los planes y programas de producción

A lo largo de este documento encontrará en primera medida, una descripción del problema que se va a estudiar, continuando con la metodología a utilizar para dar solución a la problemática. Posteriormente se tendrá el desarrollo de cada una de las acciones ejecutadas para cumplir con los propósitos planteados: Encontrará una descripción detallada de como a través de corridas de

producción realizadas en la herramienta Has-200 se logra tener un diagnostico en cuanto a su funcionamiento, tiempos de proceso, cantidad y tipos de productos defectuosos; se establecen diferentes estructuras de reprocesos que pueden ser adaptadas a la celda; continuando, se explica el proceso llevado a cabo para elaborar la simulación de estas estructuras encontradas; finalmente se establecen los resultados de estas simulaciones, logrando determinar cuál de estas estructuras se adapta mejor a la celda de manufactura, teniendo en cuenta factores como la entropía durante el proceso de fabricación, los tiempos de producción y especificaciones técnicas para su implementación real.

JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta los avances tecnológicos que se presentan día a día, las industrias en los últimos años se han visto obligadas a automatizar sus procesos de producción con el fin de reducir costos, tiempos, y errores que se puedan presentar a lo largo de los procesos de producción. Por esta razón es muy importante desarrollar investigaciones en este ámbito, dado que es algo indispensable para las actuales industrias. De acuerdo con información suministrada por Portafolio (2013) Colombia es el segundo país en Suramérica en aplicar procesos de automatización industrial, afirman que el 70% de las compras que se realizan en el país están destinadas a la adquisición de maquinarias y equipos. Lo anterior comprueba que los actuales empresarios están realizando procesos de inversión destinando recursos para transformar sus procesos manuales en procesos automatizados. Estos cambios efectuados por los empresarios, en gran parte se deben a que son más conscientes en que estos procesos automatizados les brinda la posibilidad de seguir latentes en los mercados altamente competitivos.

A pesar de que muchas industrias cuentan con procesos altamente automatizados existe la posibilidad de contar con errores a lo largo del proceso, generando inconformidades en el producto. Estos productos defectuosos pueden ser reprocesados para corregir las no conformidades, permitiendo así su retorno a la línea de producción.

Al realizar estos reprocesos las empresas inciden en cierto tipo de problemas mayores como desórdenes en la secuencia de producción. Basados en diferentes factores como tiempos de entrega a los clientes, tiempos de procesamiento, costos etc., las empresas deben determinar el orden en que deben ser procesados cada uno de sus productos, pero al momento de aparecer productos defectuosos este orden se ve alterado generando así un grado de complejidad o desorden.

El presente proyecto tiene como fin analizar el grado de entropía que se genera en una secuencia de producción al momento de presentarse reprocesos durante la fabricación de productos. Se abarcarán temas de automatización ya que el desarrollo y validación del proyecto se llevará a cabo en la celda de Manufactura HAS-200 con la que cuenta la facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Libre.

Se decidió dar este tipo de enfoque al proyecto debido a que abarca temas que actualmente no son muy trabajados por los estudiantes de la facultad de Ingeniera Industrial de la Universidad Libre. Además de ello, se quiere hacer uso de una de las herramientas que brinda la Universidad a los estudiantes como lo es la celda de manufactura, la cual permite estudiar diversos temas como lo son estudio de tiempos, cuellos de botella, inventarios, calidad, secuenciación etc.

Al trabajar este proyecto en uno de los laboratorios con los que cuenta la Universidad, se brinda la posibilidad como primera parte de aumentar las funcionalidades de esta sofisticada herramienta, logrando que más procesos puedan ser estudiados y analizados; como segunda parte, de elaborar nuevas guías de trabajo que puedan ser utilizadas como apoyo para los procesos de aprendizaje de los estudiantes en diferentes asignaturas.

El proyecto a pesar de ser teórico y de validarse en un sistema que simula un proceso producción, puede ser aplicado a una industria real, en la cual se pueda cuantificar y analizar con datos reales el problema a estudiar y a partir de ello poder tomar decisiones para mejorar los procesos.

Analizando el problema desde un punto de vista empresarial real, el no reprocesamiento de productos defectuosos puede generar serios problemas ambientales primero en cuanto al control de desperdicios y segundo en cuanto al uso desmedido de recursos naturales, energéticos y materias primas para remplazar los productos que fueron desechados. De esta manera el estudio de este tema y su profundización puede contribuir a que se logren impactos importantes en materia de protección y cuidado al medio ambiente.

1. GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En todo proceso de producción, incluso en los totalmente automatizados, existe la posibilidad de que se presenten defectos en los productos fabricados. Estos productos defectuosos son considerados como de baja calidad, por no cumplir con las especificaciones requeridas tanto por la empresa como por los clientes.

Cuando este tipo de problemas se presentan, las empresas deben establecer qué tipo de procedimientos se deben seguir para tratar estos productos defectuosos. Estas actividades realizadas sobre los productos defectuosos con el objetivo de eliminar las no conformidades se denominan como *Reprocesos.* Tal y como lo mencionan Yu & Efstathiou (2006), existe la necesidad de estudiar distintas formas de realizar reprocesos de productos defectuosos y analizar su impacto en la complejidad o desorden en las secuencias de producción establecidas para ambientes *flow shop*, de acuerdo con los autores existen cinco estructuras de reproceso que pueden ser medidas según el desorden generado al reprocesar productos defectuosos en una celda de manufactura automatizada.

Para el caso específico de la Universidad Libre, la celda de manufactura Has-200, resulta ser un objeto de estudio sobre el cual se pueden validar los avances de Yu & Efstathiou (2006), procurando establecer otras medidas de desempeño y nuevas formas de gestionar los reprocesos con el fin de reducir el desorden de la corrida de producción.

La celda resulta ser un objeto de estudio apropiado, pues presenta altos índices de productos defectuosos que se generan a lo largo del proceso de producción. Para validar esta afirmación, se realizaron pruebas de muestreo para cuantificar la cantidad de productos defectuosos que se presentaban en la celda de manufactura, así como para determinar los tipos de errores que podrían llegar a presentarse y en qué estaciones se solían presentar.

Para realizar el muestreo como primer paso fue necesario calcular el tamaño de la muestra, este número nos indicaría la cantidad de productos que debían ser procesados en la celda. A partir de allí, se siguieron los lineamientos establecidos por la fórmula 1, la cual es utilizada para calcular el tamaño de la muestra cuando la población es infinita:

Fórmula 1. Tamaño de la muestra

$$n = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2}$$

Fuente: Caballero, Fernandez, Jimenez, Olmo, & Oya

Donde:

- $Z =$ coeficiente de confiabilidad
- $p =$probabilidad de éxito
- $e =$error

De acuerdo con los parámetros necesarios para desarrollar la formula, se estableció un nivel de confianza del 94%, por consiguiente, el valor del error corresponde al 6%. El valor de Z para el nivel de confianza seleccionado equivale a 1.88. Finalmente, el valor de la probabilidad de éxito es del 50% debido a que no se cuenta con información previa del estudio a realizar.

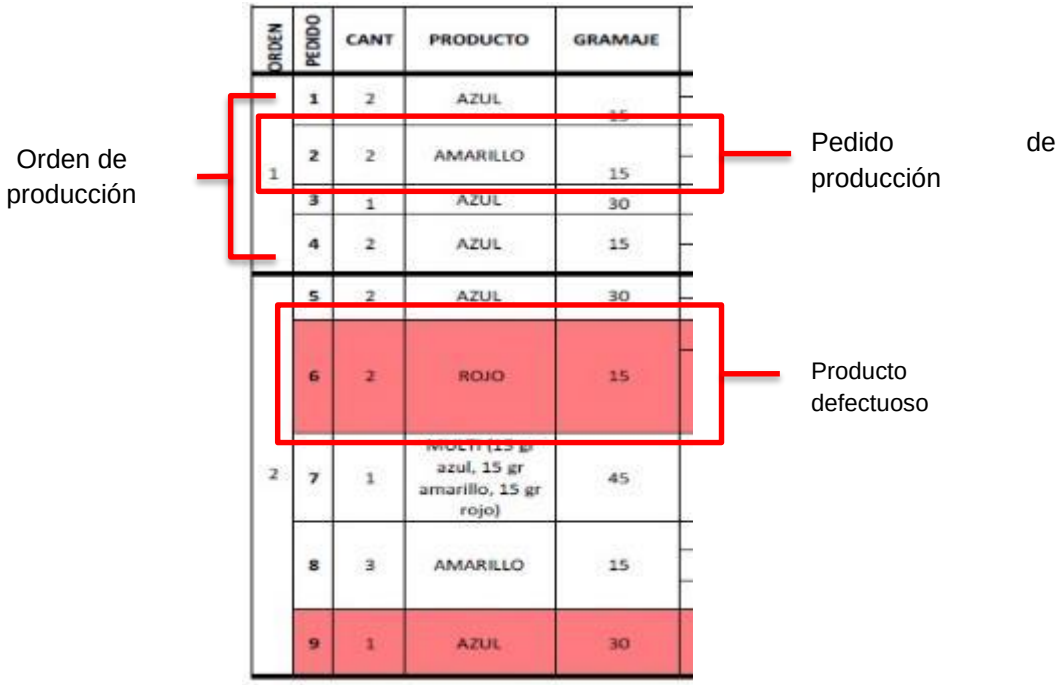
Una vez establecida la información, se procedió a desarrollar la fórmula 1:

$$n = \frac{1.88^2 * 0.50(1 - 0.50)}{0.06^2} = 245.44$$

Según el resultado arrojado, 246 productos debían ser procesados en la celda a fin de obtener datos confiables para realizar el estudio. Una vez establecida esta cantidad se ejecutaron las corridas de producción en la celda, las cuales consistieron en procesar 26 órdenes o lotes de productos, donde cada una de ellas constaba de cuatro o más pedidos que a su vez tenían definida una cantidad de botes a fabricar con sus respectivas características de color y gramaje. En total las 26 órdenes incluyeron 246 botes, para los cuales se hizo un estudio de tiempos y conteo de productos defectuosos que se presentaron. (Ver Anexo 1-Corridas de producción).

Para el experimento realizado, un pedido está compuesto por varios productos de diferentes características que han sido solicitados por los clientes. La unión de varios pedidos conforma una orden de producción. Se puede entonces evidenciar que la figura 1 muestra dos órdenes de producción, donde la primera orden está conformada por cuatro pedidos y la segunda por cinco; en total 16 productos fueron fabricados en estas dos órdenes.

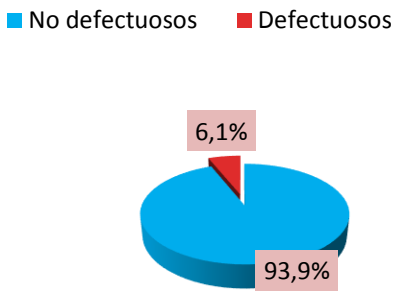
Figura 1. Conceptos de orden, pedido y producto



Fuente: Autoras (2016)

Una vez terminada la corrida con las 26 órdenes de producción, se analizaron los datos recolectados y se obtuvieron los siguientes resultados:

Gráfico 1. Cantidad productos defectuosos



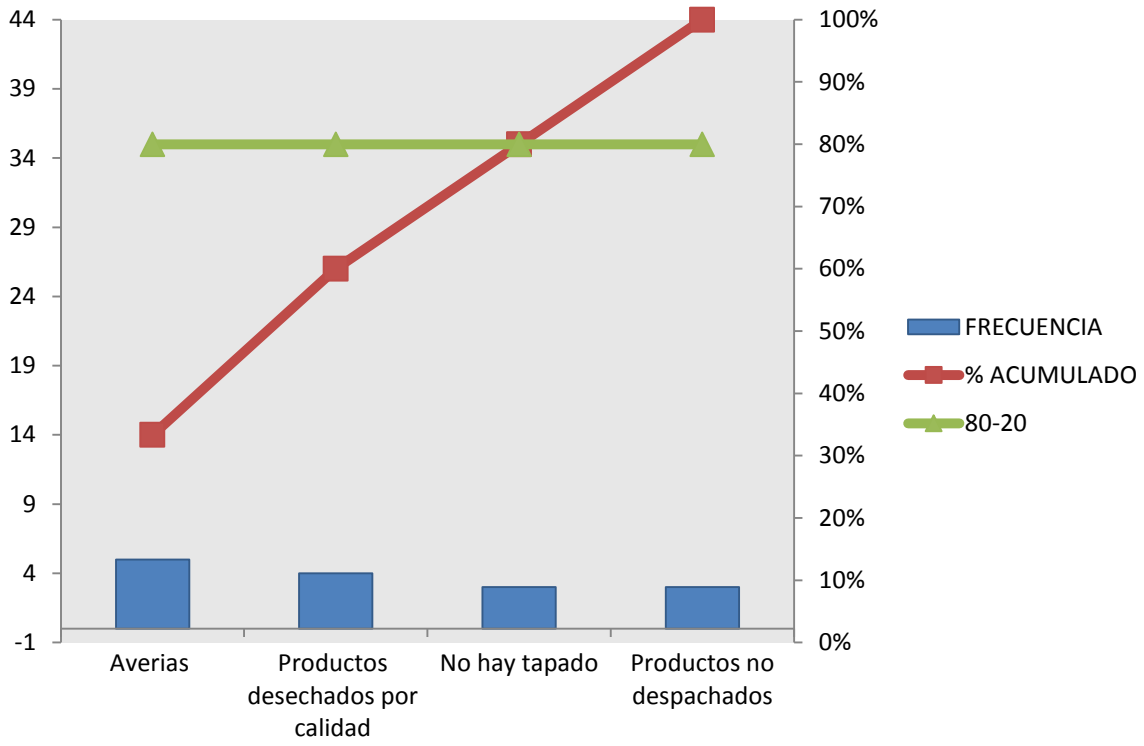
Fuente: Autoras (2017)

Tal y como se evidencia en el gráfico 1, el 6,1% de los productos fueron defectuosos, esto indica que 15 de los 246 productos no cumplieron con las especificaciones. Los defectos que se presentaron en los productos se generaron debido a múltiples factores:

- **No hay proceso de tapado.** Muchos de los productos no ingresaron a la estación de tapado al momento de llegar allí, por consiguiente no fueron despachados.
- **No se despachó el producto**. Los botes no fueron despachados, en algunos casos porque los botes no ingresaron a las estaciones de calidad.
- **Averías en las estaciones**: Durante la ejecución de algunas corridas de producción, algunas estaciones presentaron fallos que ocasionaron el estancamiento de algunos productos en las estaciones donde se presentó la avería.
- **Productos desechados en estaciones de calidad**: Algunos productos fueron desechados luego de pasar por el control de calidad, esto dado a que estos botes recibieron menor o mayor cantidad de producto a la establecida inicialmente en la orden de producción.

El gráfico 2 corresponde a un diagrama de Pareto, el cual permite visualizar las frecuencias con que ocurrieron los diferentes tipos de defectos descritos anteriormente. A través de este, se puede determinar que el error con mayor porcentaje de ocurrencia fue el relacionado al estancamiento de productos en las diferentes estaciones en donde se presentaban averías, de los 246 productos solicitados 5 de estos no fueron procesados.

Gráfico 2. Frecuencia tipos de defecto



Fuente: Autoras (2017)

El segundo problema que se presentó con mayor frecuencia estuvo relacionado con los productos desechados en calidad. Una vez los botes fueron inspeccionados, las estaciones de calidad desecharon estos productos dado que el gramaje con el que fueron llenados no correspondía al registrado en la orden. Este tipo de problema dio como resultado 4 productos defectuosos. Con este diagrama de Pareto también se puede deducir que las tres primeras causas: averías en las estaciones, productos desechados en calidad y el no tapado de los botes, están generando el 80% de los defectos en los productos procesados en la celda. Con tres botes no despachados, se completa el total de 15 productos defectuosos.

Dadas las características del experimento realizado donde solo se pueden obtener dos posibles resultados (éxito o fracaso) con probabilidades de *p* y *q* respectivamente, se puede establecer que la distribución de probabilidad de un determinado evento dentro de este escenario es de tipo binomial.

De esta manera la función de distribución para el experimento realizado estará dada por la fórmula 2:

Fórmula 2. Función distribución Binomial

$$X \sim B(n,p) \rightarrow X \sim B(246, 0.061)$$

Fuente: Caballero, Fernandez, Jimenez, Olmo, & Oya (2006)

Donde:

- n =tamaño de la muestra
- p =probabilidad de éxito.

Como se puede evidenciar los datos utilizados para determinar la función de distribución corresponden por un lado al tamaño de la muestra, el cual para el experimento equivale a los 246 productos procesados en la celda, y por otro lado la probabilidad de éxitos, valor equivalente al 6.1% de los productos defectuosos.

La fórmula 3 corresponde a la media de la distribución binomial que está dada por los mismos parámetros de la su función:

Fórmula 3. Media distribución binomial

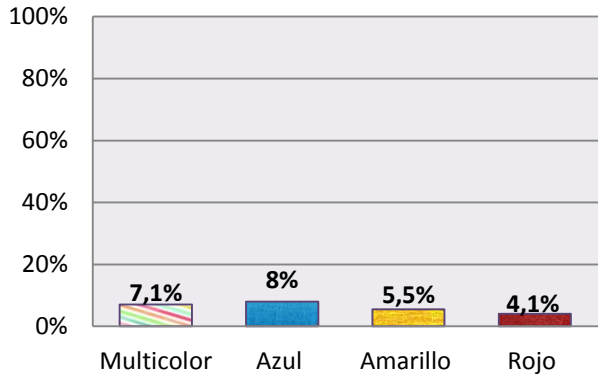
$$\bar{x} = n * p \ \rightarrow \bar{x} = 6 * 0.061 = 0.366$$

Fuente: Caballero, Fernandez, Jimenez, Olmo, & Oya (2006)

De esta manera tomando una muestra de 6 productos y con una probabilidad de éxito de 0.061, es correcto afirmar que en promedio por cada 6 productos procesados en la celda el 0,3 son defectuosos.

Analizando los productos defectuosos por color, se obtuvieron los siguientes resultados:

Gráfico 3. Productos defectuosos por Color



Fuente: Autoras (2017)

Tabla 1. Productos defectuosos por color

PRODUCTO	CANT PRODUCTOS PROCESADOS	PRODUCTOS DEFECTUOSOS
Multicolor	70	5
Azul	50	4
Amarillo	54	3
Rojo	72	3

Fuente: Autoras (2017)

De acuerdo con la información presentada tanto en el grafico 3 como en la tabla 1, los productos Azules fueron los que más porcentaje de error presentaron durante la corrida de producción. El 8% de los productos azules sufrieron algún tipo de defecto.

El segundo producto que presentó el mayor porcentaje de error fue el multicolor. De las 70 unidades multicolor procesadas en la celda, 5 de ellas presentaron defectos. De estas 5 unidades 3 fueron desechadas en las estaciones de calidad. En cuanto a los productos de color amarillo, 2 de los 3 productos defectuosos se originaron a causa de las averías en las diferentes estaciones. Finalmente, el 4.1% de los productos rojos, fueron productos defectuosos, 2 de estos fueron ocasionados por averías presentadas en las estaciones y uno fue desechado en las estaciones de calidad.

A continuación, la tabla 2 muestra una relación entre los defectos presentados por color y los tipos de defectos:

Tabla 2. Relación productos defectuosos por color y tipo de defecto

		TIPO DE DEFECTO				
		No hay tapado	Producto no despachado	Averías	Productos desechados en calidad	Total
PRODUCTO	Multicolor	--	2	--	3	**5**
	Azul	2	1	1	--	**4**
	Amarillo	1	--	2	--	**3**
	Rojo	--	--	2	1	**3**
TOTAL		**3**	**3**	**5**	**4**	**15**

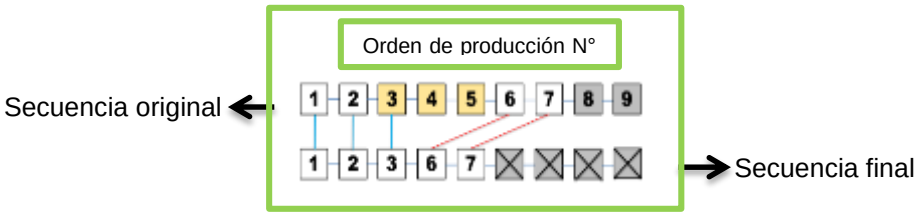
Fuente: Autoras (2017)

Otro problema evidenciado en los resultados de las corridas está relacionado con el cambio de posiciones que se generaban en los productos enviados por cada orden. Por diferentes causas, que serán mencionadas más adelante, el orden de los productos con que eran enviados a través del ordenador cambiaba a lo largo del proceso, generando que en la estación de despacho llegarán con una secuencia diferente a la establecida originalmente. Se realizó un registro del desorden presentado en los pedidos de cada orden, el cual se evidencia en la tabla 3.

Como se muestra en la figura 2, los recuadros enumerados correspondientes a la fila superior indican el orden en que fueron enviados los productos, los recuadros inferiores indican el orden en que llegaron a la última estación para ser despachados. Los recuadros de color amarillo indican los productos que presentaron algún tipo de defecto, mientras que los recuadros de color gris, representan productos que no fueron despachados. Las líneas de color representan si el producto cambio o no su posición original, de esta manera las líneas azules indican que el producto conservo su posición desde el inicio del proceso hasta el final, por otro lado, las líneas de color rojo representa aquellos productos que cambiaron de posición. Bajo esta descripción se observa que la figura 2, correspondiente a la orden de producción 6, cuenta con tres productos defectuosos, y

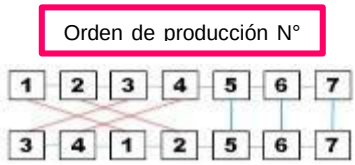
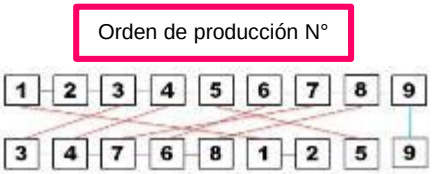
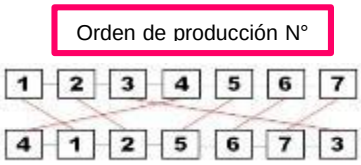
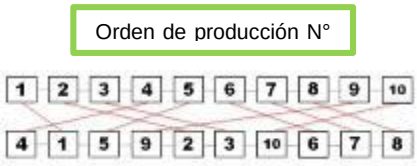
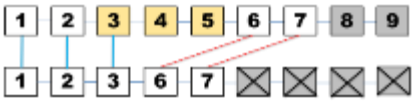
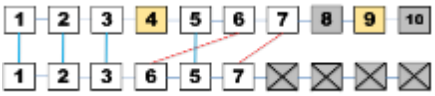
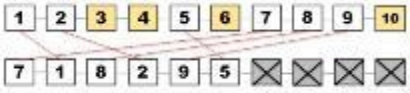
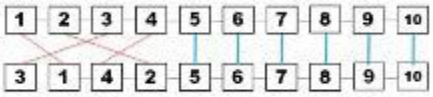
cuatro que no fueron despachados; los productos 1, 2 y 3 conservaron su posición original durante todo el proceso; los productos 6 y 7 sufrieron cambios de posición.

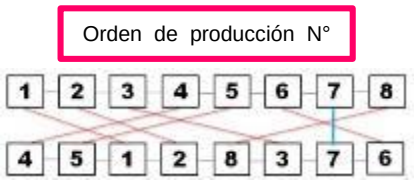
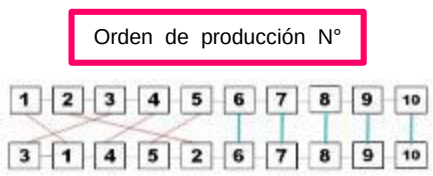
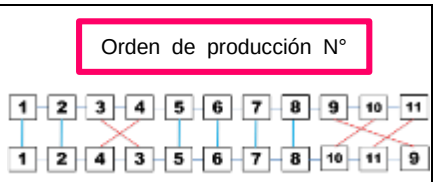
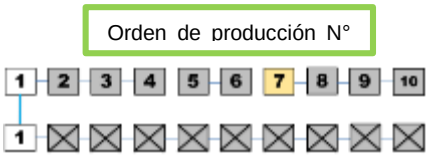
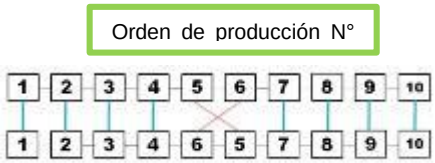
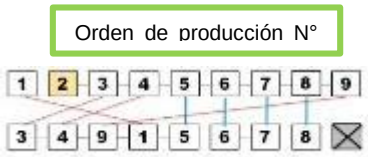
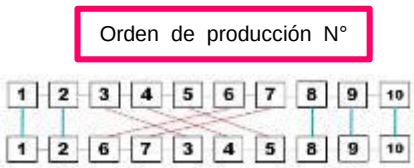
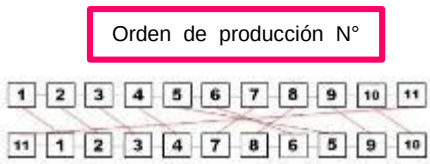
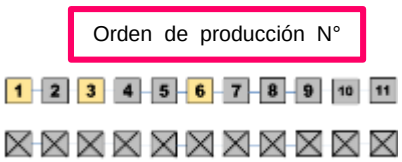
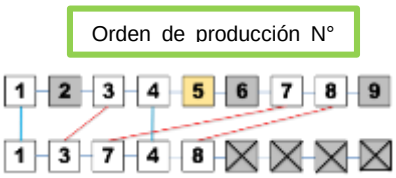
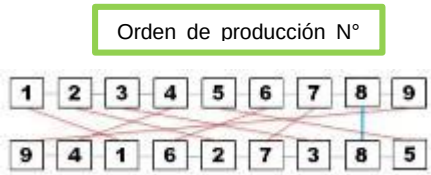
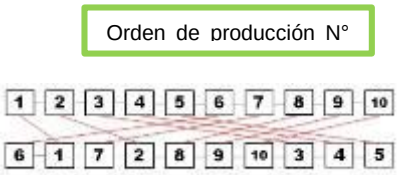
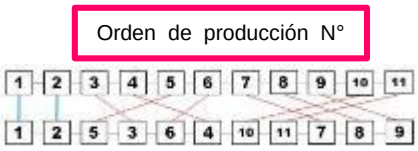
Figura 2. Descripción desorden de la secuencia



Fuente: Autoras (2017)

Tabla 3. Resultado desorden en las secuencias de producción

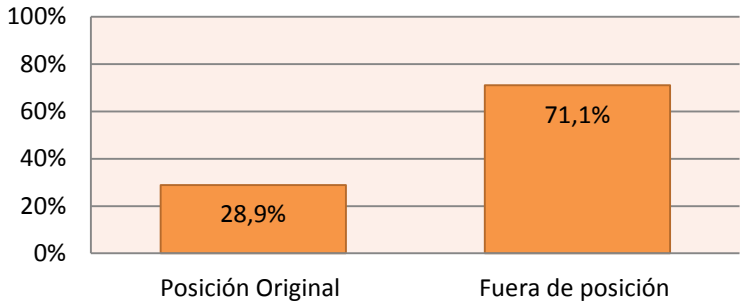
					
En posición	3	En posición	1	En posición	0
Fuera de posición	4	Fuera de posición	8	Fuera de posición	7
					
En posición	0	En posición	5	En posición	3
Fuera de posición	10	Fuera de posición	2	Fuera de posición	6
					
En posición	4	En posición	6	En posición	0
Fuera de posición	6	Fuera de posición	3	Fuera de posición	10
					
En posición	0	En posición	6	En posición	6
Fuera de posición	9	Fuera de posición	4	Fuera de posición	3

					
En posición	1	En posición	5	En posición	6
Fuera de posición	7	Fuera de posición	5	Fuera de posición	5
					
En posición	1	En posición	8	En posición	4
Fuera de posición	9	Fuera de posición	2	Fuera de posición	5
					
En posición	5	En posición	0	En posición	0
Fuera de posición	5	Fuera de posición	11	Fuera de posición	11
					
En posición	2	En posición	1	En posición	0
Fuera de posición	7	Fuera de posición	8	Fuera de posición	10
					
En posición	2			En posición	2
Fuera de posición	9			Fuera de posición	9

Fuente: Autoras (2017)

Como se puede evidenciar en el gráfico 4, el 71.1% de los productos sufrieron algún cambio de posición a lo largo de la corrida de producción. De los 246 productos fabricados en la celda, 175 de ellos no conservaron su posición inicial.

Gráfico 4. Cambio de posición en la secuencia de producción



Fuente: Autoras (2017)

De las 26 órdenes de producción enviadas en la celda ninguna de ellas conservó la secuencia de cada uno de sus productos desde el inicio hasta el final del proceso. Se cuenta con casos como las órdenes 12 y 16, donde una parte de los productos conservaron su posición original, pero por problemas presentados en la celda se canceló la producción de los productos restantes.

Este desorden en las secuencias de producción se debe a dos causas principales, la primera está relacionada a configuraciones internas de la celda. La celda en muchas ocasiones, de forma automática cambia el orden de fabricación dada inicialmente a través del ordenador, esto con el objetivo de evitar cuellos de botella en las estaciones siguientes a las de llenado. La segunda causa se encuentra relacionada con la presencia de productos defectuosos. En algunas de las órdenes, el desorden iniciaba debido a la aparición de productos no conformes. Como evidencia de esto se tienen las órdenes 15 y 22, donde al momento de presentarse el primer producto defectuoso, la secuencia de producción se alteró de forma parcial.

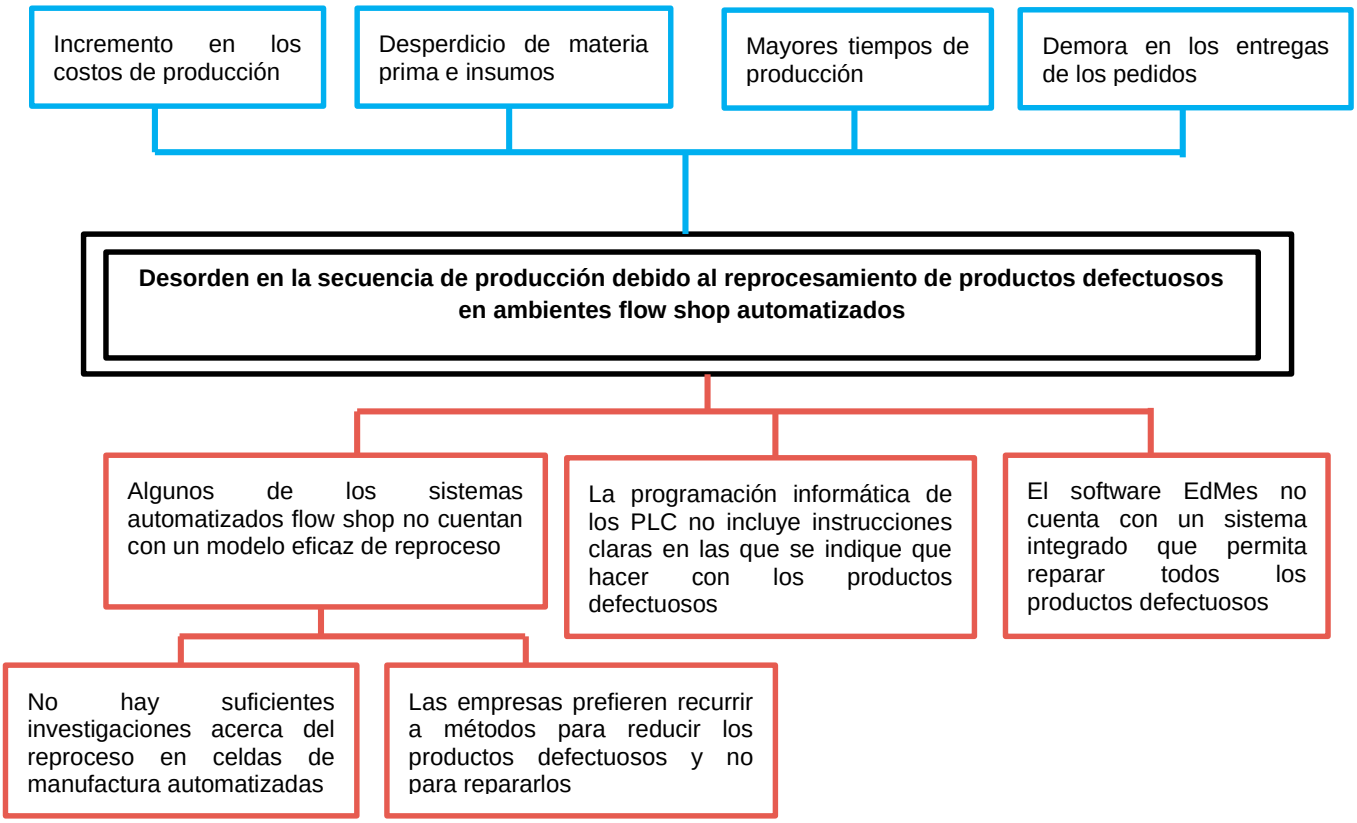
De esta manera se puede evidenciar que la celda de manufactura a pesar de ser un sistema de simulación altamanete automatizado, no está exenta de contar con productos defectuosos durante sus procesos de producción. Además de ello también se logra evidenciar que la aparición de estos productos defectuosos a lo largo de la línea, altera el orden de la secuencia establecida inicialmente para cada uno de los trabajos programados.

Este tipo de problemas en la celda, genera como primera medida mayores tiempos de producción. Al momento de aparecer productos defectuosos en medio del proceso, el tiempo de producción aumenta debido a que deberán repararse, tomando así un tiempo adicional. De igual manera, si los productos no son reprocesados, también requerirá de tiempo adicional para volver a fabricar aquellos productos que no cumplen con las especificaciones. Los dos anteriores problemas mencionados provocan demora en las entregas de los pedidos.

Otros problemas adicionales que conllevan los reprocesos en la celda, está relacionado con desperdicios de materia prima y aumento en los costos de fabricación. Estos problemas no se ven reflejados en la celda de forma directa debido a que esta simula un proceso de producción, es decir que en realidad la fabricación de los productos defectuosos no traerá como consecuencia aumentos en los costos o desperdicio de materia prima. A pesar de esto son variables que debemos tener en cuenta ya que estos factores sí intervienen en un proceso de fabricación real.

De acuerdo con la información presentada a lo largo de todo el documento y en esta última sección, se presenta el árbol de problemas (Figura 3) para el sistema de reproceso en la celda de manufactura:

Figura 3. Árbol de problemas



Fuente: Autoras (2016)

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A partir de lo presentado en la sección anterior se establece la formulación del problema, la cual está compuesta por una pregunta principal y tres complementarias que ayudarán a guiar el desarrollo del proyecto:

¿Qué tipo de reprocesamiento es el más adecuado para aplicar a la celda Has-200 que permita reducir el desorden (entropía) de la secuenciación de producción?

De esta pregunta principal se desglosan las siguientes:

- ¿Qué implicaciones tiene la reducción de la entropía en medidas de efectividad como el makespan en la celda Has-200?
- ¿De qué manera se podrían incluir variables adicionales en los modelos de planeación y programación de producción, de manera que se tenga en cuenta la entropía?

- ¿Qué factores se deben tener en cuenta para realizar un proceso de simulación de un ambiente flow shop automatizado?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General: Desarrollar un sistema de reprocesamiento de productos defectuosos para ambientes flow shop orientado hacia la disminución de la entropía en la secuenciación de producción, a través de la validación de distintas alternativas en la Celda Has 200.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar el funcionamiento de la celda de manufactura en términos de sus componentes y procesos.
- Identificar las estructuras de reprocesamiento de productos no conformes dentro de la celda que resulten ser más adecuadas en términos de su funcionalidad, diseño y pertinencia.
- Modelar las estructuras encontradas a través de procesos de simulación que permitan explorar su impacto en la entropía y eficacia del proceso productivo.
- Determinar la mejor forma de reproceso que disminuya la entropía en la secuenciación, aplicable a la celda de manufactura, procurando mantener la eficacia del proceso.
- Proponer un esquema de relación entre los mecanismos de disminución de la entropía y las modificaciones pertinentes en los planes y programas de producción

1.4 MARCO METODOLÓGICO

1.4.1 Tipo de investigación: El tipo de investigación que se llevó a cabio es de tipo mixta. Esto se debe a que como primera parte para para el cumplimiento de los dos primeros objetivos, caracterización del funcionamiento de la celda e identificación de mecanismos de reprocesamiento, será necesario realizar procesos de búsqueda de información en fuentes bibliográficas como manuales y artículos de revistas científicas; bajo estas condiciones la primera parte del proyecto se caracteriza por una investigación de tipo cualitativa.

Por otro lado, también es una investigación cuantitativa debido a que para el desarrollo del objetivo tres, el cual consiste en realizar una simulación, será necesario realizar corridas de producción en la celda, y posteriormente cuantificar y analizar los datos recolectados.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, se determina que el tipo de investigación a desarrollar es mixto por contener investigación tanto cualitativa como cuantitativa.

1.4.2 Metodología: A continuación, en la tabla 4 se presentan las actividades, metodologías y técnicas de recolección de datos, los cuales permitirán el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos planteados.

Tabla 4. Metodología

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	METODOLOGÍA	MECANISMO DE RECOLECCIÓN DE DATOS
1. Caracterizar el funcionamiento de la celda de manufactura en términos de sus componentes y procesos	Solicitar manuales de funcionamiento y guías de practicas	A través de la revisión de manuales e información obtenida de las entrevistas se establecen las características propias de la celda como el funcionamiento del software EdMes y variables que intervienen en el proceso. Realizando corridas de producción se determinan los comportamientos que toman cada una de las variables dentro del proceso, estos servirán como base para el proceso de simulación.	• Observación directa • Históricos • Bases de datos EDMES
	Documentar la información encontrada		
	Diseñar encuestas y entrevistas		• Entrevistas • Encuestas • Bases de datos
	Identificar personal directamente relacionado con el objeto de estudio		
	Aplicar encuestas		
	Diseñar corridas aleatorias de producción		• Observación directa • Manejo y dirección de la celda • Diagramas de proceso • Toma de tiempo • Corridas de producción • Muestreo estadístico
	Aplicar corridas diseñadas en la celda		
	Tomar tiempos de producción analizando productos defectuosos por corrida		
2. Identificar los posibles mecanismos de solución para reprocesar el producto no conforme dentro de la celda	Buscar fuentes de información	A través de una revisión bibliográfica basados en la búsqueda de artículos científicos, trabajos de grado y libros, determinar mecanismos de reproceso que se puedan aplicar a la celda de manufactura HAS -200.	• Bases de datos • Matriz de priorización
	Buscar temas relacionados al objeto de estudio		
	Analizar la información encontrada		
	Filtrar la información		
3. Modelar las estructuras encontradas a través de procesos de	Buscar alternativas de software de simulación	Mediante consultas sobre características técnicas y de funcionamiento de software de simulación se hace selección de la mejor alternativa que se adapte al	• Información de software • Fuentes bibliográficas • Muestreo estadístico • Planos celda HAS-200
	Seleccionar Software de simulación a utilizar		

simulación	Estudiar sobre el funcionamiento del software	desarrollo del proyecto. Tomando como referencia los datos recolectados de las corridas de producción realizadas inicialmente, se hace el proceso de simulación de la celda de manufactura HAS -200, incluyendo en el diseño los modelos de reproceso encontrados. Una vez diseñada la interfaz de la celda con las estructuras de reproceso, realizar corridas de producción en la simulación.	• Software • Corridas de producción • Toma de tiempos • Diseño de las estructuras de reproceso
	Diseñar el funcionamiento de la celda		
	Adicionar las estructuras de reproceso encontradas al diseño de funcionamiento de la celda		
	Simular corridas de producción		• Corridas de producción • Toma de tiempos
4. Determinar la mejor estructura de reproceso aplicable a la celda de manufactura HAS-200 que disminuya la entropía en la secuencia de producción.	Documentar los resultados obtenidos	Comparando el desempeño de las estructuras de reproceso en cuanto a la entropía del sistema, basados en el modelo matemático expuesto por Yu & Efstathiou (2006) se determina la estructura de reproceso que mejor se adapta a la celda de manufactura HAS-200.	• Medidas de desempeño • Métodos comparativos de procesos • Muestreo estadístico
	Tabular los resultados		
	Analizar los resultados midiendo la entropía		
	Seleccionar la mejor estructura de reproceso para la celda de manufactura HAS-200		• Resultados estadísticos • Toma de decisiones
5. Proponer un esquema de relación entre los mecanismos de disminución de la entropía y las modificaciones pertinentes en los planes y programas de producción.	Identificar variables asociadas al reproceso	A partir de un estudio de caso se pretende hacer una comparación del antes y después de haber aplicado la solución propuesta. Se propone construir un modelo que refleje la programación de la producción en la celda de manufactura. Este modelo sufrirá modificaciones en términos de sus variables constitutivas, buscando cuantificar el impacto de los reprocesos de manera que se pueda utilizar en otros escenarios. El modelo no será de optimización, sino que solamente cuantificará las relaciones entre las variables.	• Análisis estadístico
	Proponer un modelo que tenga en cuenta los reprocesos y mida su impacto en los planes y programas de producción		
	Incluir estas variables en el modelo para verificar su impacto en términos de las medidas de desempeño		

Fuente: Autoras (2017)

1.5 MARCO REFERENCIAL

1.5.1 Antecedentes: Uno de los mayores retos para las empresas hoy en día, es lograr mantener su competitividad en el mercado. Esta competitividad es lograda por las empresas cuando estas aseguran la calidad y confiabilidad de cada uno de sus productos. Lamentablemente en algunos casos la calidad de los productos se ve afectada, en el momento en que dentro del proceso de fabricación se presentan fallas, provocando defectos en los artículos.

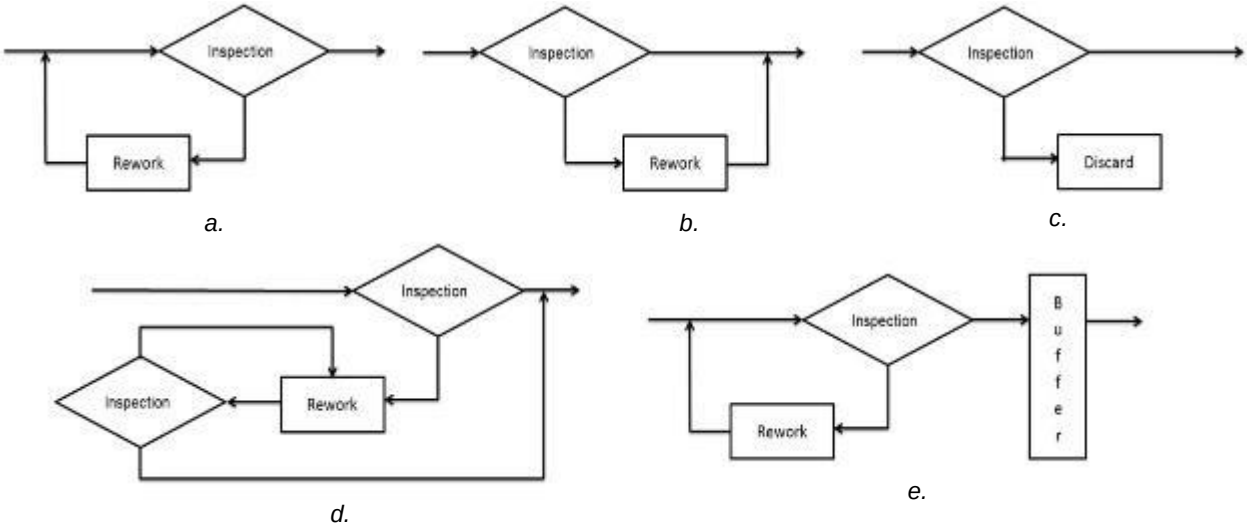
Para evitar estos problemas relacionados con la producción de artículos defectuosos, con el pasar de los años se han desarrollado modelos de producción enfocados a mejorar el rendimiento en los procesos, en pro de evitar o disminuir las tasas de productos defectuosos. Algunas empresas así como investigaciones se han orientado a implementar y crear sistemas que permitan procesar nuevamente esos productos que no cumplen con las especificaciones para que posiblemente puedan llegar a ser productos de calidad. Estos sistemas que permiten procesar nuevamente los productos defectuosos se conocen como *Reprocesos; Lanham (2007)* define el reproceso como actividades realizadas sobre un producto no conforme con el objetivo de eliminar esa no conformidad. La razón por la cual muchas empresas deciden mejorar sus procesos para disminuir la tasa de productos defectuosos, en lugar de implementar un sistema de reproceso, se debe a que no solo se incurrirá en trabajo extra causando pérdidas de dinero y tiempo, sino que también se inducen a problemas mayores en cuanto al control del desorden generado en la secuencia de producción a causa de los artículos defectuosos que son reparados.

Una vez las piezas defectuosas son rechazadas después del proceso de inspección, estas son enviadas al reproceso para corregir las no conformidades; mientras ocurre este proceso de reparación, otras piezas pasarán la inspección para continuar con el proceso de producción. De esta manera las piezas enviadas en esta orden de producción cambiarán de posiciones alterando la secuenciación original con la que se supone deberían llegar al final del proceso.

Se realizó un sondeo a manera de revisión de literatura, identificando en total 9 referencias asociadas a temas como: Reprocesamiento de productos, sistemas de producción flow shop, y secuenciación de producción. A partir de esto, se realiza una descripción de las referencias más importantes que contribuyen al desarrollo del proyecto:

- Yu & Efstathiou (2006), en su artículo *Complexity in rework cells: theory, analysis and comparison,* explican y cuantifican, a través de un modelo matemático, el desorden de la secuencia de producción causado por el reproceso de productos defectuosos. Como primera medida, identifican cinco estructuras de reproceso que pueden ser implementadas en una celda de manufactura (Ver figura 4)

Figura 4. Estructuras de retrabajo



Fuente: Yu & Efstathoiu (2006)

a. Celda de retrabajo hacia atrás: Estructura sencilla de circuito cerrado, el sistema se alimenta de los artículos rechazados que ingresan de nuevo a la corriente principal después de ser reparados, para ser inspeccionados de nuevo. Con la retroalimentación, la calidad de todas las partes es garantizada.

b. Celda de retrabajo hacia adelante: Estructura dividida en dos caminos, que a diferencia de la estructura anterior los artículos reparados no son inspeccionados de nuevo. Es decir que puede haber partes defectuosas que son introducidas al proceso de producción si la estación de reproceso no los repara en el primer intento.

c. Celda de descarte: Estructura dividida en dos caminos. Consiste en un sistema sin reparación después de realizada la inspección. Los productos imperfectos son desechados inmediatamente. Esta estructura es utilizada para aquellos casos donde los productos defectuosos no pueden ser modificados o porque no es económicamente hacerlo.

d. Celda de reproceso doble hacia atrás: Estructura que cuenta con una segunda inspección, donde los ítems reparados son revisados de nuevo en una estación separada a la inspección inicial. Se caracteriza porque el proceso de reparación es repetitivo hasta que el artículo pase la inspección. Una vez modificados los errores, el artículo vuelve a la línea de producción.

e. Celda de reproceso hacia atrás con regulador: Su funcionamiento es similar a la estructura de celda de retrabajo hacia atrás, con la diferencia de que esta cuenta con un almacenamiento intermedio. Este almacenamiento retiene todos los productos hasta el momento en que los productos defectuosos sean reparados y así lograr despachar toda la orden completa. En este buffer se puede reorganizar la secuencia de producción para que los productos queden en el orden correcto. Aun así se incurren tanto en retardos para entregar los demás pedidos como en costos adicionales.

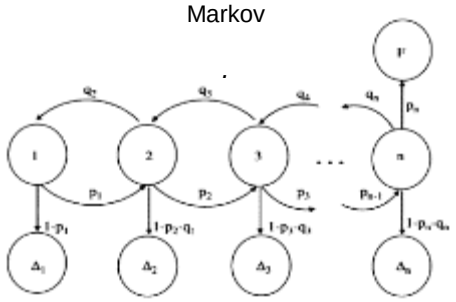
Posterior a esto, explican el desarrollo de un primer modelo matemático, basado en procesos entrópicos, con el cual se logra calcular el grado de desorden que se genera en una secuencia de producción, cuando es necesario realizar reproceso en productos defectuosos. El proceso de validación del modelo se realizó estableciendo cantidades hipotéticas de tasas de producción, productos defectuosos, productos que cambian su posición original debido al reproceso y de esta manera lograr analizar la funcionalidad de su modelo. Su segundo modelo matemático, permite analizar la complejidad de recorrido; con él, es posible determinar la probabilidad de que un artículo tome por un determinado camino, teniendo las diferentes rutas que puede seguir después de pasar por una estación de calidad.

Finalmente establece una comparación entre cada uno de los modelos de celda con reproceso, analizando aspectos como la complejidad de recorrido, costos y calidad.

- Bijari, Barzoki, & Jahanbazi, (2007) desarrollaron una investigación en la Universidad de Tecnología Isfahan (Irán) en donde basados en el modelo de inventarios GTOQ creado por Boucher (1984), logran ampliar el modelo de inventarios teniendo en cuenta la probabilidad de que los productos imperfectos generados en el proceso de fabricación puedan ser reprocesados, para que sean productos de buena calidad, o no reprocesados para ser desechados y vendidos a precios más bajos. Dentro de su planteamiento matemático, establecen fórmulas para lograr determinar tiempos de proceso, promedio de ingresos, costos totales, costo de ordenar, etc. Todo esto teniendo en cuenta porcentajes tanto de productos que se pueden reprocesar como aquellos que no.

- Hadjinicola (2010) en su publicación Manufacturing costs in serial production with rework presentan las cadenas de Markov como sistemas de producción en serie, donde los estados de la cadena representan las etapas de producción y los estados absorbentes, representan la terminación del proceso de producción (Ver figura 5). Con este planteamiento, establecen una formulación matemática para hallar las probabilidades de que los productos sean desechados en cada una de las etapas del proceso y las probabilidades de que el producto pase a la siguiente etapa. Dentro del modelamiento se toma en cuenta el reproceso, donde artículos que presentan cierto tipo de defectos son devueltos a la etapa anterior para ser reparados.

Figura 5. Representación de un sistema de producción en serie con reprocesos, a través de una cadena de Markov



Fuente: Hadjinicola (2010)

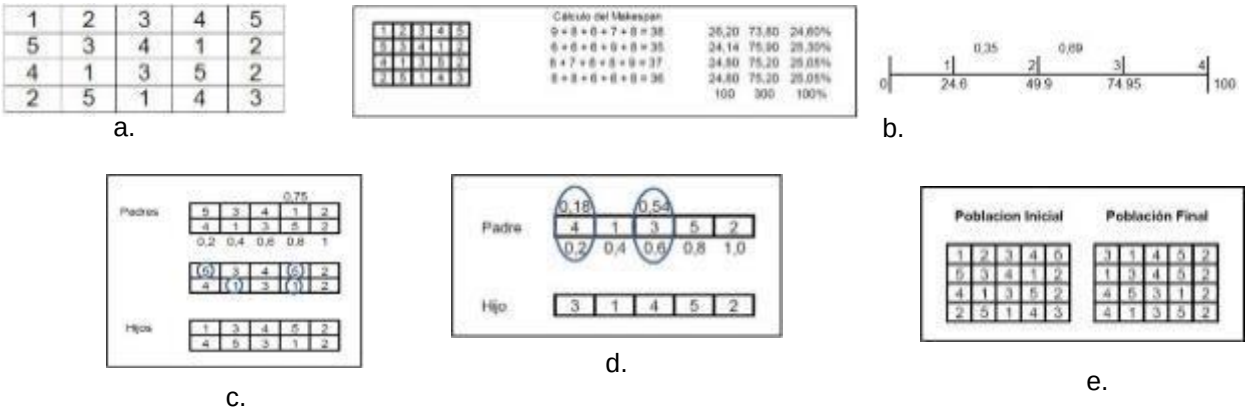
- Chiu, Chiang, Chiu, & Song (2016) en su artículo *Simultaneous determination of production and shipment decisions for a multiproduct inventory system with rework process* desarrollan un modelo matemático por medio del cual es posible calcular el costo total de fabricación de una línea de producción, contemplando dentro del planteamiento cantidades de productos defectuosos que pueden aparecer a lo largo del proceso. A partir de este modelo de costos desarrollan dos fórmulas con las cuales es posible determinar el tamaño óptimo de producción y envío de órdenes. Finalmente a través de un ejemplo numérico logran comprobar que realizando los reprocesos dentro de la línea de producción es posible conseguir una reducción en los costos totales de fabricación.

- En cuanto a estudios realizados a nivel nacional, Toro, Restrepo, & Granada (2006) en la Universidad Tecnológica de Pereira desarrollan un proyecto titulado *Algoritmo genético modificado aplicado al problema de secuenciamiento de tareas en sistemas de producción lineal – Flow Shop*, en el cual tomando como base el algoritmo propuesto por Chu-Beasley logran plantear una nueva metodología para el secuenciamiento de trabajos que permite minimizar el Makespan del proceso de producción.

- Por último Alfonso & Aponte, (2013) en su proyecto de grado desarrollaron una aplicación computacional que basada en algoritmos genéticos permite establecer la mejor secuencia de trabajos para una orden de producción. La validación de su aplicativo fue realizado en la celda de manufactura HAS-200 de la Universidad Libre. Como primer paso, realizaron un proceso de identificación de variables en donde establecieron que los individuos del algoritmo genético son las diferentes secuencias en que se pueden organizar cada una de las órdenes de producción. También se estableció que el número máximo de órdenes con el que puede trabajar la aplicación es de 10 unidades. Una vez determinadas las variables a utilizar durante el proceso, procedieron a desarrollar el software usando el leguaje de codificación de Visual Basic siendo Microsoft Excel la interfaz principal del aplicativo. Una vez terminado, el aplicativo recibió el nombre de SEKVENS.

  La figura 6, representa el proceso para obtener la mejor secuencia de productos a través del uso de algoritmos genéticos:

Figura 6. Ejemplo secuenciación de órdenes basado en algoritmos genéticos – Aplicativo SEKVENS



Fuente: Alfonso & Aponte, (2013)

a. Inicialización: El código crea de forma aleatoria una población inicial con n individuos.
b. Evaluación y selección: Se realiza un proceso de evaluación calculando el Fitness Makespan de cada uno de los individuos. Posterior a esto se deben generan dos números aleatorios los cuales permiten realizar el proceso de selección de dos individuos basados en los resultados de la evaluación del Makespan. Estos individuos seleccionados serán los padres del algoritmo.
c. Cruzamiento: Dado los individuos seleccionados como padres, tomar n órdenes de cada secuencia y realizar un cruce a fin de obtener una primera generación de hijos.
d. Mutación: Para obtener una segunda generación de hijos se selecciona de forma aleatoria uno de los individuos padres al cual se realizara la mutación. Se generan números aleatorios los cuales permiten determinar que órdenes deben cambiar de posición, teniendo en cuenta que como máximo que pueden realizar dos cambios. De esta manera se obtiene los dos genes que deben mutar.
e. Remplazo: Se realiza un comparativo entre la población inicial y la final.

Finalmente el aplicativo es validado en la Celda de Manufactura HAS-200 en donde previamente realizan corridas de producción a fin de contabilizar los tiempos de proceso. Esta misma corrida de producción es ingresada al aplicativo SEKVENS en donde se evidencia que este reorganiza cada una de las órdenes. Posteriormente al momento de realizar la corrida de producción en el orden establecido por el programa, se logra evidenciar finalmente una reducción en el tiempo de proceso final.

Una vez hecha esta revisión, el grupo de estudio se propuso responder las siguientes preguntas a manera de conclusión:

1. *¿Cuáles son los principales problemas analizados?*

   Se encontró que los principales problemas analizados en los diferentes artículos están relacionados con: La creación de nuevos modelos de inventarios los cuales incluyen tasas de productos defectuosos y productos reprocesados; la medición de la complejidad que se genera en una secuencia de producción cuando hay presencia de productos defectuosos; reducción de los tiempos de flujo del proceso a través de una buena secuenciación de trabajos; la forma en que los reprocesos de productos intervienen en el cronograma de actividades y posteriormente en la entrega de tareas a tiempo.

2. *¿Cuáles son las principales herramientas, técnicas o procesos que utilizaron los autores para resolver el problema?*

   Al mismo tiempo se identificó que las principales metodologías que utilizan los autores para resolver los problemas son: Cadenas de Markov; desarrollo de modelos matemáticos basados en sistemas entrópicos; Meta heurísticas, principalmente algoritmos genéticos para aquellos problemas relacionados con la secuenciación de tareas. Por último, análisis estadístico.

3. *¿Cuáles fueron las mejoras de los artículos tratados?*

A través de las diferentes metodologías propuestas en los artículos se logró: Tener el tamaño óptimo de lotes de producción y costos totales de fabricación cuando hay presencia de reprocesos; determinar las probabilidades de que un producto termine su proceso de fabricación dado que cuenta con defectos que no pueden ser reparados; reducir el Makespan de un proceso de producción a través de una correcta secuenciación de trabajos.

Como se mencionó anteriormente, ninguna empresa está exenta de que en sus procesos de fabricación se presenten productos defectuosos, por tanto es importante para las diferentes compañías tomar decisiones con respecto a dos factores: Cómo reducir su porcentaje de productos no conformes y qué hacer con ellos en esos casos donde se lleguen a presentar.

Muchas investigaciones a lo largo del tiempo se han dedicado a estudiar diferentes métodos que permitan reducir el porcentaje de productos no conformes, pero a través de esta revisión de literatura es posible identificar que en los últimos años han aumentado los estudios e investigaciones acerca de reprocesos de productos defectuosos, creando metodologías que permitan incluir este factor dentro de las decisiones importantes para las industrias manufactureras, como lo son: Secuenciación de trabajos, inventarios, reducción de tiempos de proceso, ayudando así a las industrias a ser más competitivas y eficientes en cada uno de sus procesos.

1.5.2 Marco teórico

1.5.2.1 Celdas de manufactura: Guerrero & Briones (2017) definen una celda de manufactura como un como un conjunto de componentes electromagnéticos que trabajan de manera coordinada para lograr la fabricación en serie de uno o varios productos. El uso de estas celdas de manufactura permite a las empresas lograr altos índices de eficiencia en sus procesos, así como altos niveles de calidad, rapidez en los procesos de fabricación y fáciles procesos de adaptabilidad cuando se requiere realizar cambios en alguno de los productos.

Los autores también establecen que existen dos tipos de celdas de manufactura:

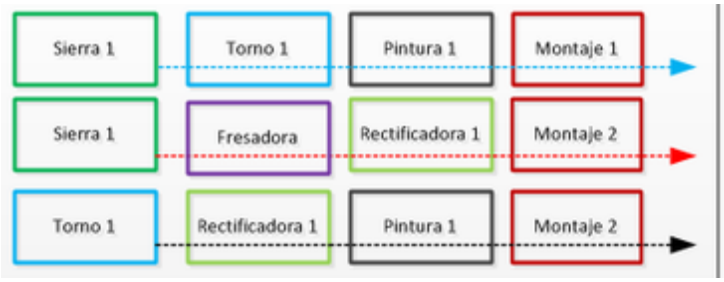
- Celda de manufactura flexible: Su característica principal está basada en que sus procesos son casi completamente automatizados, durante la fabricación no interviene la mano del hombre por lo que el proceso es asistido por control numérico computarizado. Lo anterior conlleva a que el diseño y la operación de dicha celda sea precisa, logrando altos niveles de calidad en los productos elaborados. Al tratarse de un sistema flexible permite la incorporación de nuevos módulos de trabajo al sistema.

- Celda de manufactura en “U”: Consiste en el ordenamiento de máquinas, herramientas u operarios de tal manera que los pasos del proceso estén de forma secuencial, uno después del otro, logrando las partes procesadas pasen por un flujo continuo. Normalmente este ordenamiento se realiza con el fin de que los diferentes puestos de

trabajo formen una “U”. Esta formación de la celda tiene el propósito de reducir tiempos y así realizar operaciones justo a tiempo, por ello se cambia de la forma convencional de agrupar las máquinas por departamentos a una forma más contemporánea en donde el proceso cuente con la maquinaria necesaria para que el proceso de un producto sea culminado con satisfacción. La ubicación en “U” permite que los operarios puedan comunicarse entre sí y así puedan ser un equipo en la toda la producción, también reduce el tiempo de ciclo.

1.5.2.2 Sistema de fabricación flow shop: Este tipo de sistema de fabricación se caracteriza porque todas las tareas que deben llevarse a cabo para la fabricación de un producto, necesariamente deben realizarse en el mismo orden una y otra vez, utilizando las mismas máquinas y herramientas cada vez que se inicia un nuevo proceso; esto quiere decir que es un proceso de producción repetitivo, especializado para la fabricación de productos en masa. Como características de un proceso flow shop se encuentra que el volumen a fabricar del producto es alto, cuenta con pocas referencias y sus procesos son continuos. De esta manera como se evidencia en la figura 7, la configuración de las máquinas y herramientas a utilizar se hará en función a las tareas necesarias para la fabricación del producto.

Figura 7. Representación de un sistema producción Flow shop



Fuente: Ingeniería Industrial Online. Disponible en: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/producci%C3%B3n/sistema-de-produccion-flow-shop/>[$Enero\ 22\ de\ 2017$]

Otra característica esencial es el manejo de maquinaria especializada para tareas específicas del proceso; al contar con maquinaria especializada el nivel de los operarios no es muy alto, es decir se necesitan operarios menos capacitados para los proceso. Como el producto a fabricar es de especificaciones similares lo que se hace con este sistema es abastecer un inventario para así enfrentar la demanda del mercado con una mayor capacidad de respuesta.

1.5.2.3 Automatización: La automatización es una tecnología en donde se aplican sistemas mecánicos, electrónicos y computarizados con el fin de que tareas que son realizadas habitualmente por operadores humanos pasen a ser realizadas por sistemas computarizados. En estos sistemas se encuentran dos partes: La parte operativa que es la que actúa directamente sobre la máquina, es decir los elementos que hacen que la maquina se mueva y realice la operación que le corresponde, también se encuentra la parte de mando que por lo general es un

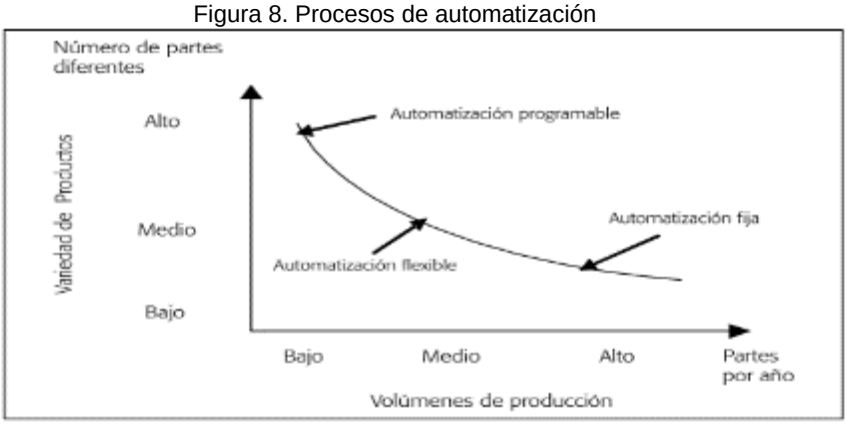
autómata programable que es el encargado de comunicar todos los constituyentes del sistema automatizado.

La automatización se divide en tres procesos que se describirán a continuación:

- Automatización fija: Esta se caracteriza por la secuencia de operaciones de procesamiento única. Se utiliza cuando el volumen de la producción es alto y cuando es un producto único para así poder tener un rendimiento alto y con tasas de producción elevadas.
- Automatización programable: Este tipo de automatización es controlada por un programa y cambia para diferentes configuraciones de un producto, este proceso se utiliza cuando hay diversidad de productos a fabricar y el volumen de producción es relativamente bajo.
- Automatización flexible: En esta es posible fabricar productos de diferentes especificaciones sin pérdidas de tiempo lo cual se da por los cambios y ajustes de los equipos de proceso entre un producto y otro. Estos procesos tienen algunas características tanto de la automatización fija como de la programable.

En la figura 8 se puede evidenciar los tres anteriores procesos de automatización con los cuales pueden contar las diferentes industrias, esto dependiendo de la variedad de sus productos y la cantidad de productos fabricados por mes.

Figura 8. Procesos de automatización



Fuente: Vallejo & Vallejo (2006)

De esta manera, si una industria cuenta con una gran variedad de productos a fabricar pero con bajos volúmenes de cada tipo de producto será esencial contar con una automatización programable, la cual permita cambiar con facilidad las funcionalidades de los diferentes equipos para fabricar cada uno de los productos solicitados. Este tipo de automatización es ideal para empresas con sistemas de producción personalizada. Por otro lado si cuenta con una baja variedad de productos, pero estos tienen alta demanda es recomendable contar con una automatización fija. Este tipo de automatización es recomendada para sistemas de producción en masa.

Un proceso automatizado está compuesto por cuatro elementos fundamentales

- Infraestructura de equipos: Estos son lo que ejecutaran las operaciones de transformación para así obtener el producto final.

- Programa de instrucciones: Aquí es donde se defines las acciones a desarrollar según el proceso de cada producto.
- Arquitectura del sistema de control: En este se definen los requerimientos necesarios de instrumentación, PLC y sistemas de supervisión para ejecutar el proceso de producción.
- Sistema de control: Es el encargado de ejecutar el programa de instrucciones del sistema automático y es el que a su vez permite la realización del proceso, en este se definen los ciclos de trabajo en donde se declaran los pasos a seguir en cada ciclo.

En la automatización se encuentran 5 niveles que son:

1. Nivel de campo: En este es en donde se encuentran todos los dispositivos físicos presentes como sensores y actuadores del sistema.
2. Nivel de control: En este están los dispositivos que se encargan de controlar el sistema como ordenadores y PLC.
3. Nivel de supervisión (SCADA): Este corresponde a los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, en este se pueden encontrar estaciones de operación y servidores de proceso.
4. Nivel superior (MES): Este es el nivel de planificación y en este se encuentran los sistemas de ejecución de la producción, en otras palabras es el software especializado que está presente en los computadores especializados para llevar a cabo la distribución de la información de la planta y a su vez generar los reportes pertinentes.
5. Nivel de gestión (ERP): En este nivel se encuentran software especializados para la planificación y administración de la producción.

1.5.2.4 Secuenciación de producción: Chase, Jacobs, & Aquilano (2009) definen la secuenciación de trabajos como aquel proceso en que se determina el orden en que una serie de pedidos deben ser procesos en una máquina o centros de trabajo. Para determinar el orden en que los diferentes pedidos deben ser procesados existen reglas de prioridad, las cuales determinar la correcta secuenciación basados en uno o varios parámetros como tiempos de entrega, tiempos de procesamiento, costos etc.

Dependiendo de la cantidad de máquinas o centros de trabajos disponibles, existen ciertas reglas de secuenciación las cuales pueden ser utilizadas con el fin de determinar el mejor orden en que deben ser procesados los trabajos.

1. n cantidad de trabajos deben ser procesados en una sola máquina. Estos casos de secuenciación son conocidos bajo la relación $n/1$. Actualmente existen ocho reglas de prioridad aplicables a este caso:

- FCFC (first-come, first served / Primero en entrar, primero en trabajarse): Los pedidos se fabrican de acuerdo al orden en que llegan al centro de trabajo o máquina.

- SOT (shortest operating *time* / Tiempo de operación más breve): Se ejecutan primero los trabajos con el tiempo de operación más breve, luego los siguientes más breves. En algunas ocasiones esta regla es combinada con otras metodologías para evitar retardos en

los trabajos con mayores tiempos de procesamiento, a fin de que no se retrasen demasiado.

- EDD (*earliest due date first* / Primero el plazo más próximo): Se procesa los trabajos con a fecha de vencimiento más próxima.

- STR (*slack time remaining* / Tiempo ocioso restante): Se calcula como el tiempo que queda antes de que se venza el plazo, menos el tiempo de procesamiento. Los pedidos con menor tiempo ocioso restante se ejecutan primero.

Fórmula 4. Tiempo ocioso restante

$$STR = tiempo\ restante\ antes\ de\ la\ fecha\ de\ vencimiento - tiempo\ de\ procesamiento$$

Fuente: Chase, Jacobs & Aquilano (2009)

- STR/OP (*slack time remaining per operation* / Tiempo ocioso restante por operación): Se ejecutan primero los pedidos con el menor tiempo ocioso por número de operaciones.

Fórmula 5. Tiempo ocioso restante por operación

$$STR/OP = \frac{STR}{Numero\ de\ operaciones\ restantes}$$

Fuente: Chase, Jacobs & Aquilano (2009)

- CR (*proporción crítica*): Se calcula como la diferencia entre la fecha de vencimiento y la fecha actual, dividida entre el número de días hábiles que quedan. Se ejecutan primero los pedidos con la menor CR.

Fórmula 6. Proporción crítica

$$CR = \frac{Fecha\ vencimiento - Fecha\ actual}{Dias\ habiles\ que\ quedan}$$

Fuente: Chase, Jacobs & Aquilano (2009)

- LCFS (*last-come, first-served* / Último en llegar, primero en trabajarse): Cuando llegan los pedidos, de ordinario se colocan arriba de la pila; el operador toma primero el que esté más alto.

- Orden aleatorio: Los supervisores u operadores escogen el trabajo que quieran ejecutar.

2. n cantidad de trabajos deben ser procesados en dos máquinas. Estos casos de secuenciación son conocidos bajo la relación $n/2$. Para secuenciar trabajos bajo esta condición en donde hay disponibilidad de dos máquinas simultaneas, se aplica la regla se secuenciación de Johnson, el cual tiene como objetivo minimizar el tiempo total de la corrida de producción, desde que inicia el primer trabaja hasta que termina el último.

Para secuenciar trabajos con la regla de Johnson, deben seguirse los siguientes pasos:

- Contabilizar los tiempos de proceso de cada trabajo en las diferentes máquinas
- Elegir el tiempo más breve.
- Si el tiempo más breve es para la primera máquina, entonces ese será el primer trabajo en realizarse; por el contrario si es para la segunda, ese trabajo deberá hacerse de último. En caso de empate, se hace el trabajo en la primera máquina.
- Repita los pasos 2 y 3 con los restantes trabajos hasta completar la programación.

La regla de Johnson puede ser utilizada para secuenciar casos hasta con relación n/3, pero no aplica para casos donde se exceda de esta cantidad de máquinas, esto debido a que aquellos problemas con más de tres máquinas son casos considerados como dinámicos donde al aplicar la regla de Johnson empezaran a formarse colas en cada uno de los posteriores centros de maquinado.

1.5.2.5 Reproceso: Cuando se hace producción en masa de algún producto en ocasiones se pueden encontrar diferentes defectos en la línea de fabricación, estas no conformidades hacen que estos productos no cumplan con las especificaciones de calidad y por ello sean descartados de la lista de bienes que salen al mercado; esto hace que la compañía incurra en gastos aún mayores dado que aquellos productos que son defectuosos deben remplazarse por unos nuevos para poder cumplir la demanda, y no se habla solo de la nueva creación sino también de desperdicio del material.

Reprocesar es la acción que se toma frente a un producto no conforme para que dicho producto pueda, después de un proceso determinado, cumplir con las especificaciones. Para esto primero se debe estudiar bien el tipo de defectos que más se presentan en la línea de producción y así poder diseñar la serie de actividades que deberían seguir estos productos para que su defecto sea tratado y así poder cumplir correctamente con todas las especificaciones y salir al mercado.

El reproceso nace de la necesidad de recuperar el material que más se pueda para así mismo no tener que incurrir en más gastos de producción, aunque en muchas ocasiones la implementación de un sistema de reproceso puede salir un poco costoso, este se ve reflejado el beneficio de poder recuperar muchos productos que se creían inservibles.

1.5.2.6 Complejidad y entropía: El termino complejidad puede ser aplicado para diferentes áreas y en cada una de ellas su significado es variable, por tal razón una definición concreta del término muchas veces es incompleta. A pesar de ello, desde un punto de vista general, el termino complejidad se alude a algo que es difícil de comprender, un sistema compuesto por muchos elementos los cuales a su vez cuentan con características específicas, las cuales deben ser analizadas de forma individual para analizar su comportamiento en todo el sistema.

Por otro lado el término entropía, de acuerdo con la teoría de la información, puede ser definido bien como una “medida de desorden” o como una “medida de incertidumbre”. Este desorden o incertidumbre variara dependiendo del grado de información con la que cuente el sujeto. A mayor grado de información, menor será la incertidumbre, por tanto el objetivo principal de realizar esta medición radica en la reducción o eliminación del desorden o la incertidumbre de un sistema.

Matemáticamente la entropía de un sistema puede ser medida como lo establece la fórmula 7:

Fórmula 7. Entropía de un sistema

$$H_S = -\sum_{i=1}^{N} P_i \log_2 P_i$$

Fuente: Yu & Efstathiou (2006)

Dónde:

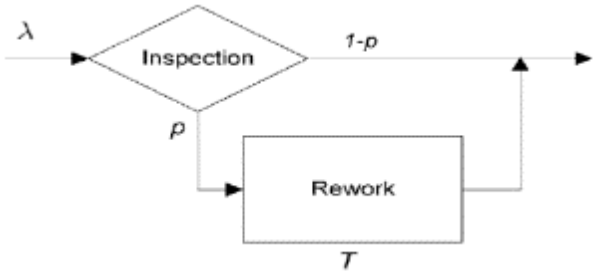
$-H_S$: Entropía de un sistema, que consta de N diferentes estados, desde i=1, 2,3…N.
$-P_i$: Probabilidad de que un estado empiece en el estado i.

La relación existente entre los dos anteriores términos está basada en que la entropía puede ser tomada como una forma para medir la complejidad de un sistema.

1.5.2.7 Modelo matemático de Yu & Efstathiou (2006): El modelo matemático planteado por los autores, toma como base la formulación de la entropía para los sistemas de información.

Como parte inicial de su planteamiento, se toma como ejemplo una celda de reproceso hacia adelante (Ver figura 9), donde se establecen los siguientes parámetros:

Figura 9. Celda de retrabajo hacia adelante



Fuente: Yu & Efstathiou (2006)

$-M$: Longitud del desorde. Referente a la cantidad de posiciones que cambia un determinado producto en la secuencia de produción
$-\lambda$: Tasa de llegada de artículos al proceso de inspección
$-\rho$: Tasa de productos rechazados en la inspección

A partir de estas variables definidas determinan una zona de reparo, fórmula 8, que equivale al número de ítems en la secuencia que han cambiado su posición.

Fórmula 8. Zona de reparo

$$R = \mathrm{int}(\lambda T) + 1$$

Fuente: Yu & Efstathiou (2006)

Esta fórmula 8 también puede ser escrita como R=Max (M)+1.

1.5.2.8 Diseño de experimentos: De acuerdo con Montgomery (2004) El diseño de experimentos consiste en modelos estadísticos los cuales pretenden determinar, a través de una serie de pruebas, que variables influyen de forma positiva o negativa en un objeto de estudio.

Una característica esencial que se debe tener en cuenta para el diseño de experimentos está relacionada con las condiciones en las cuales se realizarán las diferentes pruebas. Si cada una de las pruebas es realizada en diferentes escenarios, la variabilidad de los resultados será muy alta. Por el contrario, si se realizan siempre bajo condiciones controladas, la variabilidad es baja y serán más acertados.

Como el principal objetivo del diseño de experimentos es analizar la influencia de ciertas variables sobre el objeto de estudio, es necesario realizar varias pruebas: Unas donde se aplique el tratamiento y otras a las que no. Esto con el objetivo de analizar los diferentes cambios provocados por las variables intervinientes.

Pasos para realizar un diseño de experimentos: Montgomery (2004) establece los siguientes pasos para llevar a cabo una correcta planificación de un diseño experimental:

1. Identificación y exposición del problema: Identificar que el problema a estudiar requiere de experimentación. Posterior a esto establecer el objetivo del mismo.
2. Selección de niveles y factores: Se define *factor* como todas aquellas variables las cuales se esperan generen algún tipo de cambio en el objeto de estudio. Por otro lado los *niveles* hacen referencia a los tipos o clasificaciones del factor.
3. Selección de variable de respuesta: Hace referencia a seleccionar las unidades experimentales aplicables a todas las variables.
4. Elección de diseño experimental: Este proceso involucra temas como determinación del tamaño de la muestra, nuero de réplicas, selección de un orden de corridas.
5. Ejecución del experimento: Monitorear el proceso de ejecución a fin de comparar que vaya acorde a lo planeado. A mayor cantidad de errores cometidos menor será la validez de la información.
6. Análisis estadístico de datos: A través de metodologías de análisis de datos, evaluar los resultados objetivos del experimento.
7. Conclusiones y recomendaciones: Una vez analizados los datos, el investigador debe establecer conclusiones con respecto a lo hallado y establecer planes de acción o mejora.

Diseños experimentales clásicos: De igual manera Montgomery (2004) identifica una serie de diseños experimentales, los cuales son estándares y pueden ser utilizados en todo tipo de experimentos sin importar que difieran unos de otros, los más importantes son:

1. Experimentos comparativos simples: El objetivo de este tipo de experimento es llevar a cabo una comparación entre dos condiciones. Esta comparación puede realizarse a través de una técnica estadística llamada prueba de hipótesis, la cual pretende determinar si hay suficiente evidencia para determinar un mismo comportamiento para toda una población.

   La hipótesis estadística se define como una afirmación acerca de la situación problema. Esta examina dos hipótesis opuestas como se observa en la fórmula 9:

Fórmula 9. Hipótesis estadística

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Fuente: Montgomery (2004)

H_0 Es llamada hipótesis nula e indica que no hay efecto o diferencia, suele ser la afirmación inicial planteada por el investigador. Por otro lado H_1 es la hipótesis alternativa, la cual determina que el parámetro de la población es diferente al establecido inicialmente por el investigador.

2. Diseño factorial 2k: (Minitab INC, 2016) definen los diseños factoriales como un tipo de experimento los cuales permiten evaluar como diferentes factores aplicados a un objeto de estudio generan diferentes respuestas en estos.

   Estos diseños factoriales miden todas las posibles combinaciones de todos los factores para cada nivel. Los diseños factoriales de 2^2 son aquellos que cuentan con el menor número de corridas, al contar con solo dos factores y dos niveles, el número total de corridas a realizar es de 4.

   Por otro lado se cuenta con los diseños factoriales completos para dos niveles, estos son los diseños 2^k, donde k es el número de factores. Por tanto entre mayor sea el número de factores para dos niveles, mayor será el número de corridas a realizar para poder ejecutar de una manera correcta el experimento. Así por ejemplo, un diseño factorial de 2 niveles con 6 factores requerirá la ejecución de 64 corridas de producción, mientras que si se cuenta con 9 niveles, se está hablando de un total de 512 corridas de producción.

1.5.2.9 Generalidades de la simulación: Con el constante desarrollo que han tenido los ordenadores a través del tiempo junto con la creación de diferentes programas computacionales, las empresas han hecho uso de estas herramientas informáticas para simular proyectos de gran envergadura con las cuales es posible visualizar y analizar diferentes cambios que se puedan aplicar a la compañía sin necesidad de tener que implementarlos en la vida real.

A partir de esto Felez (2014), define la simulación como una técnica que consiste en reproducir a través de un ordenador un sistema de la vida real, con el objetivo ejecutar un sinfín de experimentos en los cuales se puedan realizar cambios en diferentes variables a fin de obtener posibles eventos y así facilitar a las empresas la toma de decisiones. El autor define entonces tres tipos de simulación:

- Simulación estática: conjunto de ecuaciones relacionadas entre sí donde el tiempo se mide en intervalos definidos. Un claro ejemplo de este tipo de simulación es el desarrollo de un modelo económico en una hoja de Excel.
- Simulación continua: tipo de simulación caracterizada por dar solución a un grupo de ecuaciones diferenciales de forma simultánea. Los resultados arrojados son tomados por

la simulación para cambiar los valores de las variables y así generar diferentes estados en el sistema.

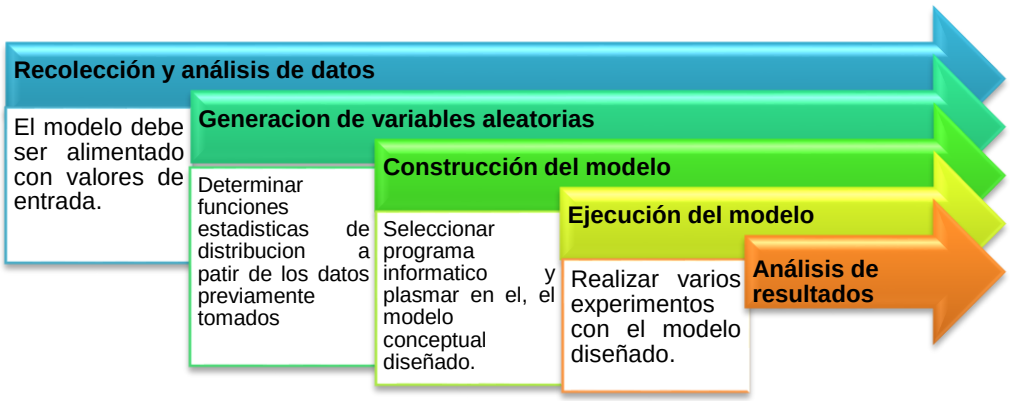
- Simulación discreta: aquí se generan y se administran eventos en el tiempo caracterizados por contar con procesos que deben seguir un orden específico y lógico. Este tipo de simulación es utilizada para modelar sistemas de líneas de producción, centro de atención hospitalaria, puntos de atención a clientes etc.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente se puede establecer que el tipo de simulación al que corresponde el desarrollo del proyecto es una Simulación Discreta. Este tipo de simulación permite modelar sistemas de alta complejidad con mayor facilidad que los otros tipos de simulación, ya que las herramientas informáticas disponibles para hacerlo son relativamente más sencillas. Adicional a esto es posible obtener informes estadísticos e indicadores muy detallados sobre los resultados de la simulación, lo cual facilita la toma de decisiones acertadas.

García & Ortega (2006) determinan que para el desarrollo de una simulación es necesario como primer paso definir los elementos del sistema, es decir determinar todos aquellos factores que harán parte del modelo. Esto con el objetivo de realizar un modelo conceptual y determinar los parámetros de diseño del sistema que se piensan plasmar en la herramienta computacional. Adicional a esto para las simulaciones también es necesario establecer las entradas y las salidas del sistema.

- Entras: variables sobre las cuales no se posee ningún tipo de control. Ejemplo: cantidad de clientes que ingresan a un determinado almacén, demanda de un producto.
- Diseño: partes del sistema sobre las cuales se tiene control. Ejemplo: cantidad de empleados en una compañía, funcionamiento de máquinas en una empresa manufacturera.
- Salidas: resultados generados de la combinación de entradas y diseños que permiten evaluar diferentes eventos para su análisis.

Una vez determinados estos tres factores, el proceso para realizar la simulación del sistema se resume en las siguientes 5 fases como se muestran en la figura 10.

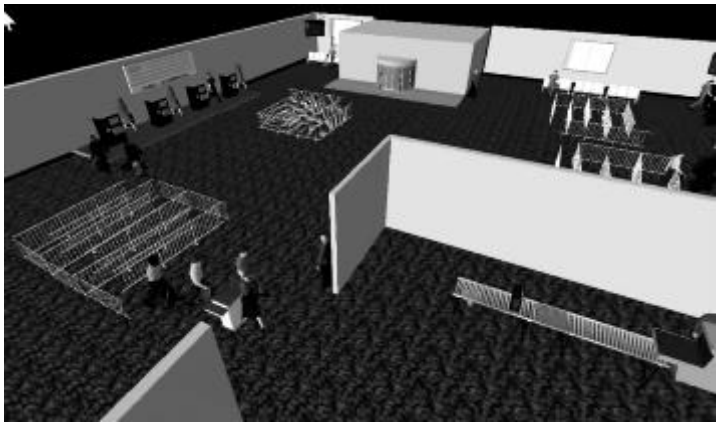


Fuente: García & Ortega (2006)

1.5.2.10 Softwares de simulación: Hoy en día existen en el mercado paquetes de software con elementos gráficos predefinidos que facilitan la tarea del montaje de los diseños de los sistemas. Estos elementos gráficos de igual manera pueden ser configurados para que cuenten con un

comportamiento idéntico al del modelo real, de esta manera estos tipos de programas son ideales para simular entornos logísticos, productivos y prestación de servicios, como el que se visualiza en la figura 11.

Figura 11. Simulación recepción de aeropuerto



Fuente: Disponible en<https://ga1.imgix.net/screenshot/o/106647-simio-1488981583-3933752?ixlib=rb-1.0.0&ch=Width%2CDPR&auto=format>[Octubre 27 de 2017]

Las plataformas permiten incorporar fotografías digitales con las cuales es posible dar más realismo al escenario que se está diseñando, de igual manera cuentan con imágenes prediseñadas de operarios, maquinaria, vehículos, edificios y diferentes tipos de productos como cajas y envases, a los cuales es posible modificar su color y tamaño. También permiten visualizar el diseño del sistema en disensiones 2D Y 3D. Este tipo de características brindan a la simulación un aspecto interactivo, agradable a la vista de los espectadores. Adicional a esto permiten la integración de datos exportados desde Excel, Lotus y Visual Basic, facilitado el montaje del proceso lógico del sistema. Cuentan con bibliotecas que almacenan sistemas ya modelados que pueden ser modificados por el usuario.

Los paquetes de simulación no requieren de lenguaje de programación, estos vienen con herramientas gráficas que facilitan la puesta en marcha de los modelos. Con la ejecución de varios experimentos es posible optimizar los procesos, encontrando la mejor combinación de diferentes parámetros claves para mejorar su eficiencia en cuanto a minimización de costos y aumento de la producción. A través de las simulaciones es posible realizar análisis y modificaciones en diferentes aspectos como:

- Cantidad de vehículos necesarios para mejorar el sistema.
- Cantidad de operarios necesarios para mejorar el sistema.
- Análisis de tiempos de procesos.
- Control de inventarios.
- Modificaciones de turnos de trabajo para los operarios.
- Tiempos de alistamiento, mantenimiento y proceso de la maquinaria.
- Cantidad de piezas a fabricar en un determinado periodo de producción.
- Creación de un nuevo producto con las actuales instalaciones.

- Diseño de una nueva planta de producción.
- Diseño o modificaciones del layout con el que cuenta una empresa
- Análisis de cuellos de botella.

A pesar de todos estos beneficios ofrecidos por los software de simulación, realizar este tipo de procesos no siempre se convierte en la mejor opción para las empresas. En primer lugar el modelamiento de un sistema requieren de largos periodos de tiempo, esto dado que es necesario realizar un estudio profundo sobre el comportamiento del mismo, teniendo como punto de partida un correcto levantamiento de información acerca del modo de operación del sistema que se piensa modelar. En segunda instancia los costos de realizar este tipo de montajes son elevados, se debe realizar contratación de personas expertas en el tema, además de estar familiarizados con el manejo de estos paquetes informáticos. Finalmente los resultados arrojados de los experimentos realizados son netamente números, por consiguiente se requiere de una alta capacidad de análisis para su correcta interpretación.

1.5.3 Marco conceptual: A continuación se establecerán ciertas definiciones de términos pertinentes a los temas que han sido abordados hasta el momento, esto con el objetivo de tener claridad en cada una de las temáticas y lograr un mejor entendimiento en cuanto al desarrollo del proyecto.

- **Reproceso:** Es la acción o acciones tomadas sobre un producto no conforme para que cumpla con las especificaciones.
- **Entropía:** Grado de desorden de un sistema, en este caso es el grado de desorden en una línea de producción.
- **Complejidad:** Sistema difícil de comprender.
- **Flow shop:** Sistema de fabricación caracterizado porque todas las tareas que deben llevarse a cabo para la fabricación de un producto, deben realizarse en el mismo orden, utilizando las mismas máquinas y herramientas cada vez que se inicia un nuevo proceso.
- **Job shop:** Sistema de fabricación en donde no todos los productos deben pasar por las mismas tareas en el mismo orden, es decir no existe un flujo único para todos los productos.
- **Celda de manufactura:** Conjunto de componentes electromagnéticos que trabajan de manera coordinada para lograr la fabricación en serie de uno o varios productos.
- **Secuenciación:** Conjunto de actividades que tienen un orden específico puesto que hay relación entre las mismas.
- **Producción:** Conjunto de actividades por las cuales se elabora un producto, esto involucra tanto recursos humanos como materiales y maquinaria.
- **Producto defectuoso:** Producto que no cumple con las especificaciones de calidad y por lo tanto no puede ser despachado.
- **Simulación:** Es una técnica que permite anticiparse a un proceso real por medio de la experimentación de un modelo que imita ciertos aspectos de la realidad de forma digital.
- **Makespan:** Es el tiempo total que transcurre desde el inicio hasta el final del proceso de producción de un producto.
- **Cuellos de botella:** Es la fase más lenta del proceso de producción y esta determina el flujo de la producción.

- **Buffer:** Es un almacenamiento provisional o temporal en la línea de producción, en donde algunos productos pueden permanecer por un tiempo determinado para después pasar a la siguiente fase del proceso.
- **Plc:** (Programmable Logic Controller) Un controlador lógico programable es un dispositivo electrónico digital que guarda instrucciones y lleva a cabo instrucciones lógicas de secuenciación, sincronización y de conteo para el control de maquinaria y procesos.
- **Edmes:** (Educational Manufacturing Execution System (MES)) Es un software que permite reproducir situaciones reales y las funciones más relevantes asociadas con un sistema de ejecución.
- **SCADA:** (Supervisory Control And Data Acquisition) Es un Sistema que está basado en computadores que permiten supervisar y controlar a distancia una instalación o proceso.
- **Algoritmos genéticos:** Es una serie de pasos organizados que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización, basados en procesos genéticos de los organismos vivos.
- **Heurísticas:** Conjunto de técnicas o métodos para resolver un problema.
- **Automatización:** Tecnología en donde se aplican sistemas mecánicos, electrónicos y computarizados con el fin de que tareas que son realizadas habitualmente por operadores humanos pasen a ser realizadas por sistemas computarizados.
- **Calidad:** Capacidad que posee un objeto o producto para satisfacer las necesidades según un parámetro es decir el grado en el que determinado producto cumple con las especificaciones.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE MANUFACTURA HAS-200

2.1.1 Descripción del objeto de estudio: La Universidad Libre cuenta con un sistema de manufactura flexible denominado celda HAS-200 (Ver figura 12) el cual reproduce un proceso productivo altamente automatizado, y permite desarrollar capacidades profesionales demandadas en diferentes sectores laborales como alimentos, farmacéuticos, automoción entre otros. El sistema HAS-200 está construido en una forma modular, cuenta con un total de 11 estaciones de trabajo, las cuales a su vez cuentan con:

- Un tramo de cintas transportadoras, las cuales permiten que la celda tenga un diseño layout, es decir que facilita la rapidez de presentación de los pedidos y la colocación eficiente de estos en existencia.
- Lector de código de barras, el cual identifica el tipo de producto que sale de las estaciones.
- Una botonera de control manual.
- Un PLC de gama alta que permite el funcionamiento de cada una de las estaciones

Figura 12. Diseño de la celda Has-200

Fuente: Manual Has-200 Sistema altamente automatizado (2002)

Al contar con una botonera y al mismo tiempo con la incorporación de un PLC dentro de las estaciones, brinda la posibilidad de manipular la celda tanto de forma manual como de forma computarizada.

La celda permite la fabricación de 19 productos diferentes, haciendo combinaciones tanto de color como de diferentes gramajes. La materia prima de la HAS-200 son perlas de colores rojas, azules y amarillas. El proceso de producción consiste en el llenado de botes que pueden tener cuatro referencias en cuanto a los colores de sus contenidos: Azul, amarillo, rojo y multicolor (Ver figura 13). Los botes pueden ser llenados con tres posibles pesos diferentes: 15 gr, 30 gr y 45 gr. Cada bote cuenta con un código de barras, con el que se puede realizar su seguimiento a lo largo del proceso.

Figura 13. Productos fabricados por la celda HAS-200

Fuente: Manual Has-200 Sistema altamente automatizado (2002)

La celda está compuesta por 10 módulos diferentes, donde cada uno cumple con una función específica dentro del proceso de producción:

- MÓDULO 1- ESTACIÓN DE LLENADO MULTICOLOR: Se encuentran los botes multicolores vacíos almacenados en un alimentador por gravedad que puede albergar hasta 36 unidades en cuatro columnas. Para ser llenados en las siguientes estaciones el operario da la orden con las especificaciones de color y gramajes.

- MÓDULOS 2, 3, 4 - ESTACIÓN DE LLENADO AZUL, AMARILLO Y ROJO: En estas estaciones se encuentran los llenados de perlas con colores azul, amarillo y rojo respectivamente. Como se puede evidenciar en la figura 14 cada estación cuenta con:

    - Una tolva en la cual está ubicada la materia prima
    - Un alimentador de botes, que al igual a la estación 1, tiene la capacidad de albergar 36 botes en cuatro columnas
    - Una cinta transportadora que incluye sensores y cilindros que controlan la salida de los recipientes.
    - Una báscula en donde se verifica el peso del material a depositar

Figura 14. Componentes módulos de llenado Azul, amarillo y rojo

Fuente: Manual Has-200 Sistema altamente automatizado (2002)

- MÓDULO 5, 6 - ESTACIÓN DE CALIDAD: Cada uno de estos módulos cuenta con un tramo de cinta adicional que se encarga de liberar el tráfico de la cinta principal (Ver figura 15). Los módulos cuentan con dos cilindros encargados de dar paso a los botes a cada uno de los sistemas de medición, que a su vez realizarán los debidos controles de calidad.

  Estos controles de calidad consisten en medir la altura de la materia prima en cada uno de los botes. Estas estaciones se diferencian una de la otra por el método usado para realizar el control: La estación 5 hace uso de un Encoder lineal, mientras que la estación 6 utiliza un transductor potenciómetro. Al medir la altura en el bote y verificar que este tiene contenido, los módulos dejarán pasar el bote para que continúe con su proceso. Si por el contrario se detecta que el bote se encuentra vacío o no tiene la cantidad de producto deseada, este es desechado en un recipiente donde su proceso productivo esa dado por terminado.

Figura 15. . Módulo 5-Primera estación de calidad

Fuente: Manual Has-200 Sistema altamente automatizado (2002*)*

- MÓDULO 7 - ESTACIÓN DE TAPADO: Encargada de colocar la tapa en la posición correcta. Como se observa en la figura 16, esta consta de un almacenamiento de dos columnas en donde se encuentran las tapas en la posición correcta. También en esta estación, se encuentra una impresora la cual se encarga de emitir etiquetas con información como fecha y lote de producción. Esta etiqueta es adherida a cada una de las tapas previamente colocadas en los botes.

Figura 16. Estación de tapado

Fuente: Manual Has-200 Sistema altamente automatizado

- MÓDULO 8 - ESTACIÓN DE ALMACENAJE: Este módulo cuenta con almacenamiento tipo horizontal y consta de 56 posiciones diferentes en donde se pueden almacenar los botes. También cuenta con una pantalla en donde se le indica a la máquina a qué posición se desea llevar el producto. Allí mismo se puede llevar un bote de una posición a otra o sacarlo para que pase a la siguiente estación. El módulo cuenta con una unidad de

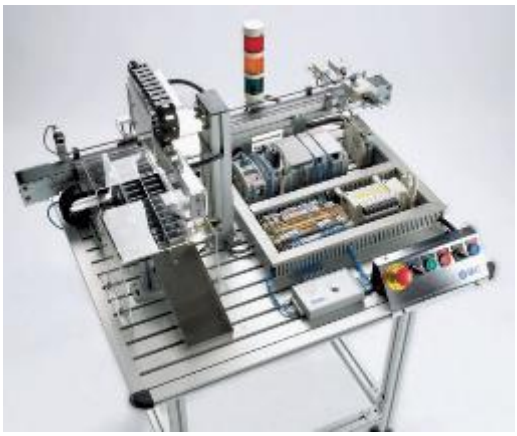
recogida en donde una pinza neumática recoge el bote y lo ubica en la posición indicada (Ver figura 17).

Figura 17. Pinza neumática-Estación de almacenaje

Fuente: Manual Has-200 Sistema altamente automatizado (2002)

- MÓDULO 9 - ESTACIÓN DE PALETIZADO: Aquí se encuentra la retirada del producto final, ubicándolo en dos rampas en donde se agrupan en bloques de cuatro unidades. Completado este número de botes se hace el despacho de los mismos. Esta estación está compuesta por un manipulador que coloca el bote en la rampa que se indique (Ver figura 18).

Figura 18. Estación de paletizado



Fuente: Manual Has-200 Sistema altamente automatizado (2002)

- MÓDULO 10 - ESTACIÓN DE RECICLAJE: Esta estación funciona de manera independiente al resto de las estaciones, el llenado del tanque de reciclaje de debe realizar de manera manual. Una vez se tenga la materia prima dentro del recipiente, mediante vibraciones esta comienza a fluir a través de un tubo estrecho y pequeño donde pasará por tres sensores cromáticos con sopladores integrados que están instalados a lo largo de la

cinta para así identificar el color correspondiente a ese bote. Al reconocerlo se activa el soplador lanzando la perla de plástico al bote de su respectivo color.

Todas y cada una de las estaciones tienen un semáforo en donde se tienen tres colores que indican diferentes situaciones.

- ROJO FIJO: La estación se encuentra parada.
- ROJO INTERMITENTE: La estación se encuentra parada en alguna situación de emergencia o algún error en el proceso.
- AMARILLO FIJO: Se ha producido algún retraso en el proceso
- VERDE FIJO: Que el proceso de la estación esta completado.

Así mismo en cada estación se puede encontrar un control de mando que consta de:

- Botón de emergencia (EMERGENCY) para realizar una parada de emergencia de la estación.
- Botón de encendido y apagado (0/I) para encender y dar par potencia eléctrica a la estación.
- Botón de marcha (START) para iniciar el funcionamiento de la estación.
- Botón de parar (STOP) para detener el funcionamiento de la estación.
- Selector de modo de funcionamiento (I/II) para conmutar entre los modos de funcionamiento integrado/manual y modo aislado de la estación.
- Botón de restablecimiento (RESET) para salir de estado de emergencia de la estación.

Como se mencionó anteriormente, la celda puede ser controlada de forma computarizada, para ello es necesario el uso del software EDMES que permite iniciar y controlar la producción desde un ordenador. También cuenta con aplicativos que permite desde la visualización de tiempos de proceso hasta controlar fallas programadas que se puedan generar dentro de la celda**.**

El proceso productivo en la celda de manufactura es caracterizado como un *flow shop*, en donde las órdenes siguen la misma secuencia independientemente de sus especificaciones.

2.1.2 Uso del laboratorio Celda de Manufactura HAS-200**:** El laboratorio de la celda de manufactura fue puesto a disposición de la comunidad académica a partir del año 2006, fecha desde la cual esta sofisticada herramienta ha sido utilizada para fines académicos siendo un excelente complemento practico para diferentes asignaturas y estudios investigativos.

De acuerdo con la Tabla 5, correspondiente a estadísticas suministradas por los laboratoristas de la universidad, entre el año del 2015 y 2016 el laboratorio fue solicitado en 151 ocasiones con un total de 352 horas de uso.

Tabla 5. Estadísticas uso celda Has-200 año 2015-2016

AÑO	DOCENTE	PROGRAMA	CANTIDAD SOLICITUDES	ASIGNATURA	HORAS DE USO
2015	Luis Leiva	Ing. Ambiental	5	Procesos	12
	Ever Fuentes	Ing. Industrial	38	Capacitación	95,5
				Procesos de producción	
				Investigación	
				Estadística	
				Gestión de la producción	
				Planeación de la producción	
	Javier Gallego	Ing. Industrial	56	Control producción	128
				Investigación	
				Estadística	
	Telesforo Vega	Ing. Industrial	1	Métodos	2
	Carlos Pardo	Ing. Industrial	1	Estadística	1,5
	Fernando Gonzales	Ing. Industrial	1	Modelos matemáticos	2
	Francisco Fonseca	Ing. Industrial	1	Estadística	2
	Leyla Ramírez	Ing. Industrial	2	Control de producción	4
	Orlando de Antonio	Ing. Industrial	1	Planeación de producción	2
	TOTAL		**106**	**TOTAL**	**249**
2016	Luis Leiva	Ing. Ambiental	6	Procesos	11
	Ever Fuentes	Ing. Industrial	33	Modelos matemáticos	72
				Métodos	
				Investigación de operaciones	
				Capacitación	
	Edgar Duarte	Ing. Industrial	2	Investigación	6
	Leyla Ramírez	Ing. Industrial	2	Control de producción	3
	Diego Suero	Ing. Industrial	1	Capacitación	9
	Telesforo Vega	Ing. Industrial	1	Métodos	2
	TOTAL		**45**	**TOTAL**	**103**

Fuente: Laboratoristas Universidad Libre (2017)

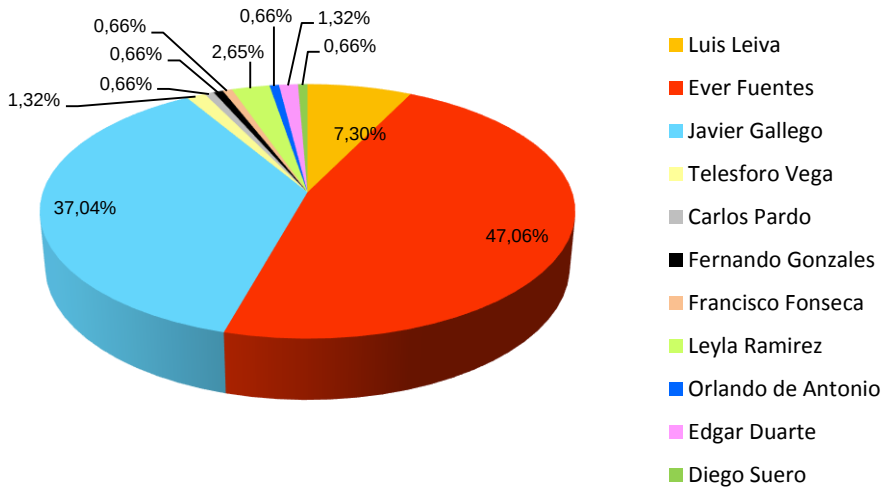
El número de horas de uso disponible por semestre asignadas para la celda de manufactura es de 1.260 horas, es decir 2.520 horas en el año. Como se puede observar con el Grafico 5, el porcentaje de utilización por año del laboratorio tan solo corresponde en promedio al 7%, con lo cual se puede inducir que la comunidad académica no está haciendo uso de la celda de manufactura.

Gráfico 5. Uso laboratorio celda Has-200

Fuente: Autoras (2017)

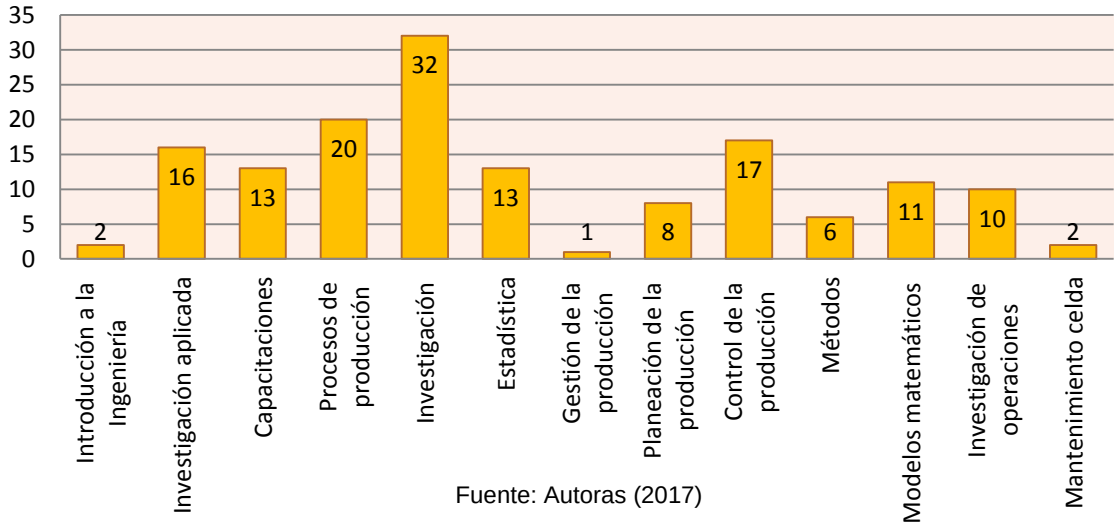
El Grafico 6 y 7 representan las solicitudes del laboratorio realizados por docentes y las asignaturas para las cuales fue solicitado

Gráfico 6. Docentes que han solicitado la celda entre 2015 y 2016



Fuente: Autoras (2017)

Gráfico 7. Asignaturas para las cuales se ha solicita la celda entre 2015 y 2016



Fuente: Autoras (2017)

Como se puede observar con el gráfico 6, el laboratorio de la celda ha sido solicitado la gran mayoría de veces por el Ingeniero Ever Fuentes y el estudiante Javier Gallego para temas de reforzamiento de asignaturas e investigación. De acuerdo con lo evidenciado en la tabla 5 y el gráfico 7 las asignaturas para las cuales el laboratorio ha sido utilizado con mayor frecuencia son investigaciones aplicadas, estadísticas y asignaturas relacionadas con producción

Para profundizar un poco más acerca del uso que los docentes han dado a la celda de manufactura, se realizaron entrevistas a aquellos docentes que solicitaron el laboratorio con más frecuencia en los años 2015 y 2016. El objetivo de esta, fue conocer las temáticas trabajadas durante las practicas, que tipo de dificultades presentaron durante la ejecución de estas y que mejoras considerarían deberían realizarse a esta herramienta. Se realizó un consolidado general de las respuestas dadas por los docentes, las cuales se evidencian en la tabla 6:

Tabla 6. Consolidado respuestas a entrevista realizada a los docentes

PREGUNTAS	RESPUESTAS A NIVEL GENERAL
¿Cuáles han sido las principales temáticas con las cuales ha hecho uso del laboratorio de la celda HAS-200?	Las principales temáticas trabajadas por los docentes del programa Ingeniería Industrial en la celda de manufactura están relacionadas con procesos de producción flow shop y job shop; secuenciación de producción para el lanzamiento de lotes de productos. Cabe resaltar que el docente Luis Leiva perteneciente al programa de Ingeniería Ambiental también ha hecho uso de la celda en repetidas ocasiones. El docente dentro de las prácticas de laboratorio abarca temas como: • Alternativas de puesto de trabajo múltiple. • Procesos programables en industrias manufactureras. • Análisis de procesos en ingeniería ambiental • Minimización del impacto ambiental a través de cambios de materiales y tecnologías.
Califique de 1 a 5 el desempeño de la celda. Siendo 5 Excelente, 4 Bueno, 3 regular, 2 Bajo, 1 Muy bajo. Si el desempeño es igual o inferior a 3, favor indicar que tipo de inconvenientes se presentaron	La calificación dada por los docentes en cuanto al desempeño de la celda se encontró entre (4) bueno y (3) regular. Algunos docentes durante el desarrollo de sus prácticas presentaron ciertos inconvenientes : • Problemas en los lectores de los códigos de barras localizados en las estaciones de llenado. • Encendido y llenado en la estación de color amarillo. • Acumulación de unidades en la estación de tapado y etiquetado. • Lentitud en el procesador computacional con el que cuenta la estación de almacenaje.
¿Qué aspectos considera se podrían mejorar en la celda de manufactura?	Los comentarios de los docentes se encontraron enfocados en mejorar la forma en la que se explica el funcionamiento de la celda. A pesar de que la celda cuenta con manuales de funcionamiento, los docentes expresan que estos no son entendibles y se requiere de mucha dedicación para lograr comprenderlos. A razón de esto sugieren que se realice como primera medida manuales o videos tutoriales relacionados a su uso, en los cuales de forma dinámica y clara se explique el funcionamiento de la celda, de tal manera que los estudiantes y docentes con tan solo realizar una

	primera visualización logren comprender el funcionamiento de la herramienta. Adicional proponen crear un manual de prácticas por asignaturas, en las cuales se puedan trabajar diferentes temáticas, en las cuales la celda sea un complemento práctico para entender la situación problema. Por último toman en consideración que la celda de manufactura debería contar con un monitor de tiempo completo, preferiblemente un estudiante de últimos semestres de ingeniería industrial o ingeniería mecánica. Esto con el objetivo de brindar una colaboración a los docentes en la creación y ejecución de diferentes prácticas para los estudiantes y estar al tanto del correcto funcionamiento de la celda.
¿Qué medidas según su criterio tomaría para que la comunidad académica haga un mayor uso del laboratorio?	• Los docentes manifestaron que la comunidad académica podría hacer un mayor uso del laboratorio si existieran guías con prácticas a desarrollar, ya que el diseño y puesta en marcha de las mismas cuando no se conoce el funcionamiento de la celda, requiere tiempo para planificar el ejercicio a desarrollar. • También sugieren que el programa de Ingeniería Industrial debería divulgar su potencialidad en las distintas materias, a fin de incentivar tanto a los docentes como a los estudiantes a hacer uso del laboratorio.
¿Qué tipo de investigaciones considera se pueden desarrollar haciendo uso del laboratorio?	Los docentes proponen que dentro del laboratorio podrían llevarse a cabo investigaciones relacionadas con: • Programación y configuración de PLC • Montajes de circuitos neumáticos, sensores, creación de nuevas estaciones, actualización de tecnologías. • Validación de resultados con proyectos enfocados a la producción.
De acuerdo con sus conocimientos acerca del manejo de la celda de manufactura, ¿Estaría dispuesto a hacer uso de esta, sin contar con el apoyo asistencial de un monitor?	Ninguno de los docentes entrevistados manifestó encontrarse en capacidad de utilizar la celda sin algún tipo de supervisión. Esto dado a la falta de familiaridad con la máquina, pudiendo aumentar el riesgo de provocar algún tipo de daño irreparable. Manifiestan que para poder obviar a un monitor, necesitarían recibir varias capacitaciones acerca del funcionamiento de la celda y conocer medidas que se puedan tomar en caso de presentarse fallas durante las prácticas.

Fuente: Autoras (2017)

De acuerdo con las respuestas dadas por los docentes, se deduce que no se está aprovechando todo el potencial con el que cuenta esta herramienta para ser utilizada en procesos investigativos y como complemento práctico en diferentes asignaturas.

La celda Has-200 puede ser utilizada en diferentes ámbitos académicos como en investigación de operaciones, logística, diseño de plantas, simulación, mantenimientos, estudios de tiempos y movimientos, seguridad industrial, estudio de planes de producción, proyectos de optimización, control estadístico de la calidad y muchos más. Lastimosamente los docentes presentan cierto grado de resistencia a hacer uso del laboratorio dado a que no tienen suficientes conocimientos en cuanto a su funcionamiento.

Presentan como sugerencias a la universidad en primera medida, designar a un monitor encargado de brindar un apoyo en las prácticas que se llevan a cabo en el laboratorio, de esta manera en caso de presentarse eventualidades contar con una respuesta rápida para dar respectiva solución. Como segundo punto a tener en cuenta, recomiendan realizar un manual con prácticas, las cuales estén relacionadas con las diferentes asignaturas incluidas en los pensum académicos de los programas de ingeniería que ofrece la universidad.

2.1.3 Tiempos de operación y ruteos de la celda HAS-200: La celda has 200 cuenta con un sistema de producción flow shop el cual está compuesto por un total de 10 estaciones de trabajo, por las cuales los diferentes productos son sometidos a procesos específicos. A pesar de que el software con el que cuenta la celda, se encuentra parametrizado para que cada tipo de producto ingrese a estaciones específicas, durante las corridas ejecutadas fue posible observar que varios productos no ingresaron a las debidas estaciones, esto generaba en muchas ocasiones la cancelación de las corridas de producción.

A partir de estos casos presentados, se estableció la tabla 7, la cual evidencia todas las posibles rutas que pueden tomar los diferentes productos dentro de la celda. Cada fila de la matriz, representa un posible evento que se puede presentar con el producto en una corrida de producción, de esta manera la variable 0 representa que el producto no ingresa a la determinada estación y 1 donde si lo hace. Bajo esta condición, se determina que aquellos eventos que cuenten con 0 en la estación de paletizado, son productos que no fueron despachados, por consiguiente continuaron avanzando en la banda transportadora. Por otro lado los productos multicolor cuentan con la posibilidad de ingresar a estaciones de llenado equivocadas, donde el contenido vertido en los botes no corresponde al programado inicialmente.

Tabla 7. Posibles rutas dentro de la celda por tipo de producto

PRODUCTO	MUTI	AZUL	AMARILLO	ROJO	CALIDAD 1	CALIDAD 2	TAPADO	INVENTARIO	PALETIZADO
AZUL	0	1	0	0	1	0	1	0	1
	0	1	0	0	0	1	1	0	1
	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	0	1	0	0	1	0	1	0	0
	0	1	0	0	0	1	1	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0
AMARILLO	0	0	1	0	1	0	1	0	1
	0	0	1	0	0	1	1	0	1
	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	0	0	1	0	1	0	1	0	0
	0	0	1	0	0	1	1	0	0
	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ROJO	0	0	0	1	1	0	1	0	1
	0	0	0	1	0	1	1	0	1
	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	1	0	1	0	0

	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	0	0	0	1	0	0	0	0	0
MULTI 15 CU	1	1	1	1	1	0	1	0	1
	1	1	1	1	0	1	1	0	1
	1	1	1	1	1	0	1	0	0
	1	1	1	1	0	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	1	0	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	1	0	0	0
	1	1	1	0	1	0	1	0	1
	1	1	1	0	0	1	1	0	1
	1	1	1	0	1	0	1	0	0
	1	1	1	0	0	1	1	0	0
	1	1	1	0	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	1	0	0	0
	1	1	1	0	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	1	0	0	0
	1	1	0	1	1	0	1	0	1
	1	1	0	1	0	1	1	0	1
	1	1	0	1	1	0	1	0	0
	1	1	0	1	0	1	1	0	0
	1	1	0	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	1	1	0	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	1	0	1	1	1	0	1	0	1
	1	0	1	1	0	1	1	0	1
	1	0	1	1	1	0	1	0	0
	1	0	1	1	0	1	1	0	0
	1	0	1	1	1	0	0	0	0
	1	0	1	1	0	1	0	0	0
	1	0	1	1	1	0	0	0	0
	1	0	1	1	0	1	0	0	0
MULTI AZ-AM	1	1	1	0	1	0	1	0	1
	1	1	1	0	0	1	1	0	1
	1	1	1	0	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	1	0	0	0
	1	1	1	0	1	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	1	0	0	0
	1	1	1	0	1	0	1	0	0
	1	1	1	0	0	1	1	0	0
	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	1	0	0	0
	1	0	1	0	1	0	0	0	0
	1	0	1	0	0	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
MULTI AZ-RO	1	1	0	1	1	0	1	0	1
	1	1	0	1	0	1	1	0	1
	1	1	0	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	1	1	0	1	1	0	0	0	0
	1	1	0	1	0	1	0	0	0
	1	1	0	1	1	0	1	0	0
	1	1	0	1	0	1	1	0	0
	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	1	0	0	0
	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	1	0	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0

	1	0	1	1	1	0	1	0	1
	1	0	1	1	0	1	1	0	1
	1	0	1	1	1	0	0	0	0
	1	0	1	1	0	1	0	0	0
	1	0	1	1	1	0	0	0	0
	1	0	1	1	0	1	0	0	0
MULTI AM-RO	1	0	1	1	1	0	1	0	0
	1	0	1	1	0	1	1	0	0
	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	1	0	1	0	0	0
	1	0	1	0	1	0	0	0	0
	1	0	1	0	0	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autoras (2017)

Adicional a esto, durante la ejecución del muestreo se realizaron registros detallados de los tiempos de proceso para cada uno de los productos en cada una de las estaciones (Ver Anexo 1- Corridas de producción). Con esto fue posible determinar promedios de producción en segundos los cuales se evidencian en la tabla 8, 9 y 10.

Tabla 8. Tiempos promedio de proceso en estaciones de llenado

PRODUCTO	ESTACIÓN MULTICOLOR	LLENADO AZUL	LLENADO AMARILLO	LLENADO ROJO
Azul 15 gr	-	0:00:47	-	-
Azul 30 gr	-	0:01:18	-	-
Azul 45 gr	-	0:01:40	-	-
Amarillo 15 gr	-	-	0:00:38	-
Amarillo 30 gr	-	-	0:00:51	-
Amarillo 45 gr	-	-	0:00:59	-
Rojo 15 gr	-	-	-	0:00:37
Rojo 30 gr	-	-	-	0:00:46
Rojo 45 gr	-	-	-	0:00:51
Multicolor (15 Az-15 Am-15 Ro)	0:00:21	0:00:44	0:00:32	0:00:36
Multicolor (15 Az-15 Am)	0:00:22	0:00:48	-	-
Multicolor (15 Az-15 Ro)	0:00:23	0:00:48	-	0:00:36
Multicolor (15 Az-30 Am)	0:00:22	0:00:49	0:01:04	-
Multicolor (15 Az-30 Ro)	0:00:21	0:00:54	-	0:00:39
Multicolor (30 Az-15 Am)	0:00:20	0:01:10	0:00:32	-
Multicolor (30 Az-15 Ro)	0:00:21	0:01:09	-	0:00:36
Multicolor (15 Am-15 Ro)	0:00:22	-	0:00:44	0:00:36
Multicolor (15 Am-30 Ro)	0:00:21	-	0:00:30	0:00:40
Multicolor (30 Am-15 Ro)	0:00:20	-	0:00:47	0:00:35

Fuente: Autoras (2017)

Dado que la celda cuenta con un total de 19 productos diferentes los cuales varían en color y gramaje, los tiempos para las estaciones de llenado serán diferentes dependiendo de estos dos factores.

Como se evidencia en la tabla 8, existen valores nulos los cuales indican que el producto no realiza proceso en la estación, de esta manera si se analizan los productos de color azul, estos solo cuentan con tiempos de operación en la estación de llenado de este color y tendrá valores nulos para las estaciones de llenado, multicolor, amarillo y rojo. También cabe aclarar que los tiempos registrados en la estación multicolor no corresponde a tiempos de llenado, ya que la estación no cuenta con producto para verter en los botes, los tiempos corresponden al proceso que se realiza en seleccionar el bote y depositarlo en la banda transportadora.

La tabla 9 muestra los tiempos promedios de proceso en las estaciones siguientes a las de llenado, los cuales son estándares para todos los tipos de productos sin importar su color o gramaje.

Tabla 9. Tiempos de proceso estándares

ESTACION	PROMEDIO TIEMPO DE PROCESO
Calidad 1	0:00:29
Calidad 2	0:00:29
Tapado	0:00:24
Almacenaje	0:00:02
Paletizado	0:00:22

Fuente: Autoras (2017)

Dado que no se utilizó la estación de almacenaje durante el muestreo realizado, el tiempo de proceso registrado en la tabla 9, corresponde al tiempo que toma el lector de esta estación en identificar el código de barras de cada producto.

Finalmente también se contabilizó los tiempos de transporte (Ver tabla 10), tiempos que corresponden a los trayectos que realizaban los botes entre cada una de las estaciones.

Tabla 10. Tiempos de transporte

TRAYECTO	TIEMPO DE TRANSPORTE
Multicolor-Llenado Azul	0:00:08
Llenado Azul-Llenado Amarillo	0:00:08
Llenado Amarillo-Llenado Rojo	0:00:08
Llenado Rojo-Calidad 1	0:00:05
Calidad 1-Calidad 2	0:00:08
Calidad 2-Tapado	0:00:08
Tapado-Inventario	0:00:05
Inventario-Paletizado	0:00:05

Fuente: Autoras (2017)

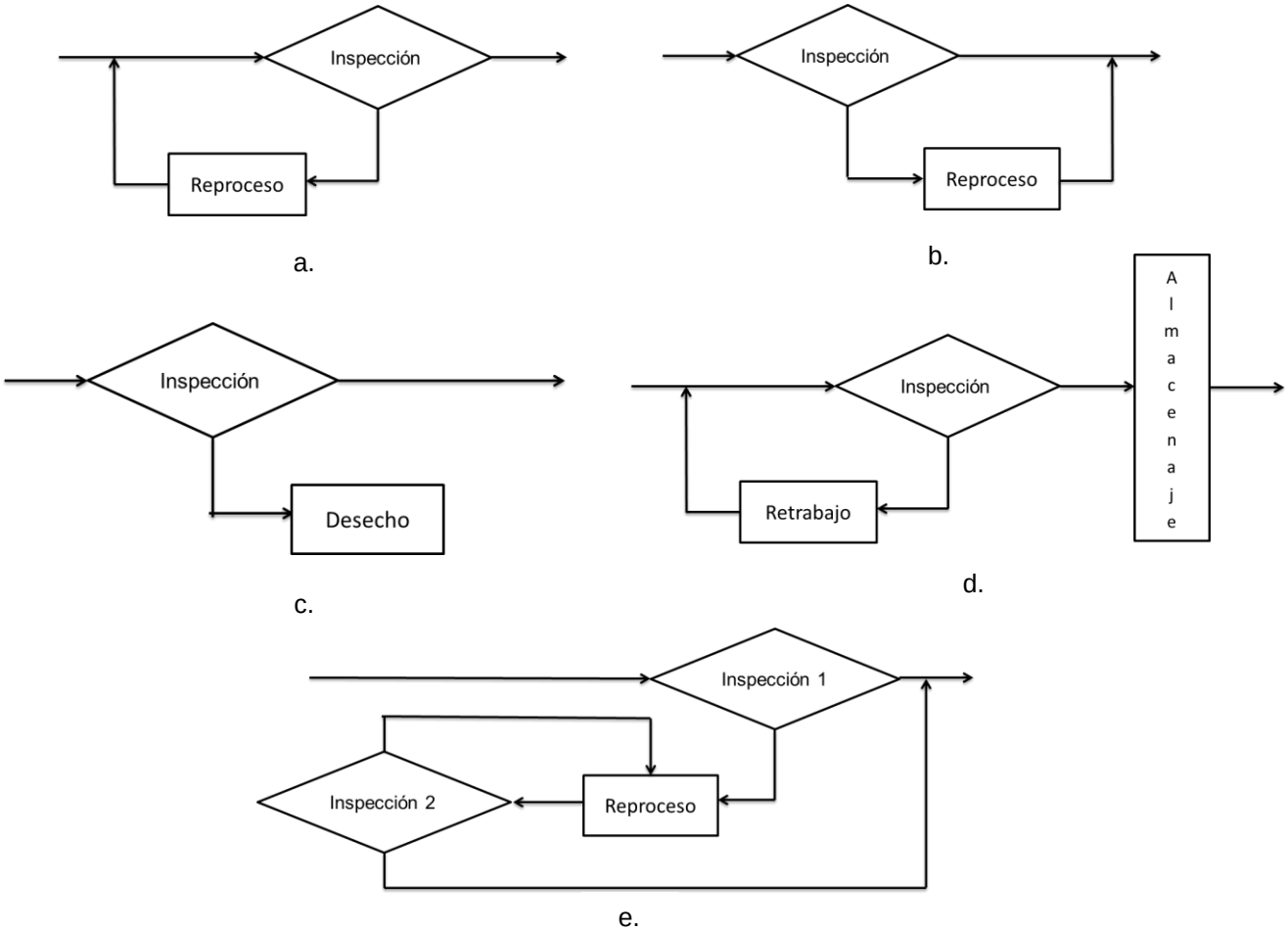
2.2 IDENTIFICACIÓN DE MECANISMOS DE REPROCESO

En la sección Descripción del problema, se determinaron los tipos de productos defectuosos que se generaron en las corridas de producción realizadas en la celda. Se identificaron 4 tipos de defectos los cuales eran ocasionados en diferentes estaciones de trabajo.

Dado que el análisis de cada tipo de defecto lleva consigo el estudio de diferentes variables, es complejo realizar un estudio de todos los tipos de defecto. A partir de esto, para el desarrollo del proyecto solo se tendrán en cuenta aquellos productos defectuosos que fueron rechazados en las estaciones de calidad. Esta determinación se toma en base a que este proyecto investigativo hace una validación de las ideas planteadas por los autores Yu & Efstathiou (2006) en su artículo *Complexity in rework cells: theory, analysis and comparison*, haciendo uso de la celda Has-200.

2.2.1 Estructuras de reproceso adaptadas a la celda Has-200: En el artículo mencionado anteriormente y como se explicó en el apartado de antecedentes, los autores Yu & Efstathiou (2006) mencionan cinco estructuras de reproceso (Ver figura 19) con las que puede contar una celda de manufactura a fin de reprocesar los productos defectuosos originados en una secuencia de producción.

Figura 19. Estructuras de reproceso que pueden adaptarse a la celda



Fuente: Yu & Efstathoiu (2006)

De acuerdo con lo expuesto en la figura 19 las estructuras cuentan con dos factores esenciales, un proceso de inspección y una zona de reproceso. Todos los productos en la línea de producción deberán pasar por un control de calidad para verificar si cumplen con las especificaciones establecidas. Si pasan el control de calidad, continúan el proceso de producción, pero en caso de ser rechazados deberán pasar a un reproceso donde serán corregidos los errores encontrados.

Bajo estas primicias, el funcionamiento de las estructuras expuestas pueden validarse con la celda de manufactura dado que esta herramienta cuenta con estaciones de control de calidad, pero no con módulos encargados de reprocesar los productos desechados en los procesos de verificación.

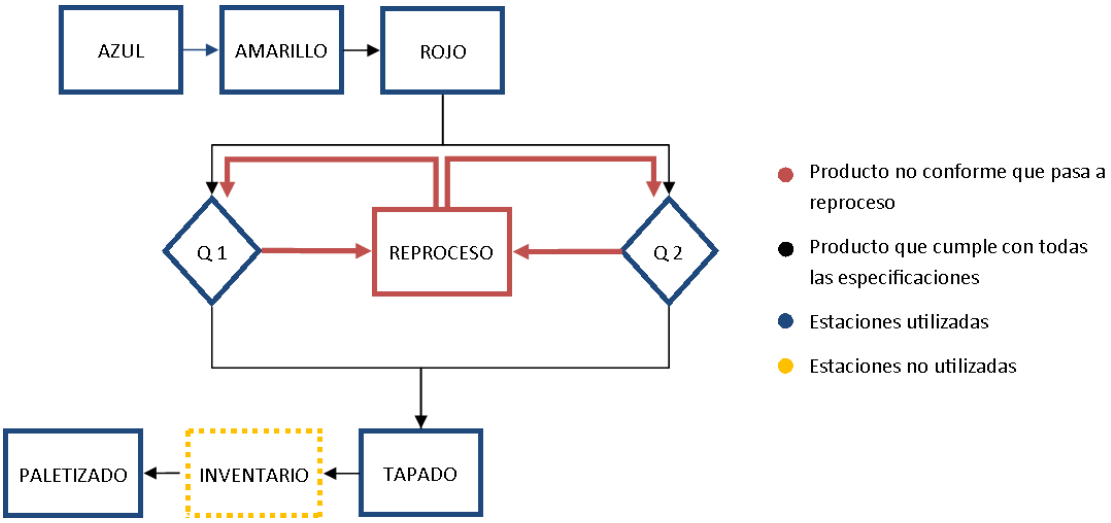
De esta manera se presenta a continuación una explicación de cómo las diferentes estructuras expuestas por los dos autores, pueden ser adaptadas a la celda de manufacturas Has-200.

2.2.1.1 Estructura de reproceso A: Esta primera estructura de reproceso, plantea que los productos reprocesados deben pasar nuevamente por la inspección para ser verificados nuevamente. Si fallan la inspección serán enviados al reproceso por segunda vez y el proceso será repetitivo hasta que los productos defectuosos queden en óptimas condiciones. De esta forma se garantiza que los productos que continúan en con el proceso de producción son productos de calidad.

Dado que la celda de manufactura cuenta con dos estaciones de calidad, durante las corridas de producción realizadas en el laboratorio se hizo uso de ambos módulos, configurando el sistema de tal manera que el 50% de los productos lanzados en una orden de producción, ingresaran a la primera estación de calidad y equivalente restante a la segunda.

Bajo esta condición la implementación de esta primera estructura se plantea haciendo uso de una sola estación de reproceso para ambas estaciones de calidad. La figura 20, permite visualizar a través de un diagrama de flujo el funcionamiento de este nuevo módulo.

Figura 20. Estructura de reproceso A adaptada a la celda Has-200



Fuente: Autoras (2017)

De acuerdo con la figura 20, el flujo de proceso guiado por la línea de color negro, representa los productos que una vez verificados en la estaciones de calidad continúan con el proceso de producción hacia la estación de tapado. Por otro lado, el proceso direccionado por las líneas de color rojo especifica el recorrido a realizar por los productos que deben pasar al reproceso.

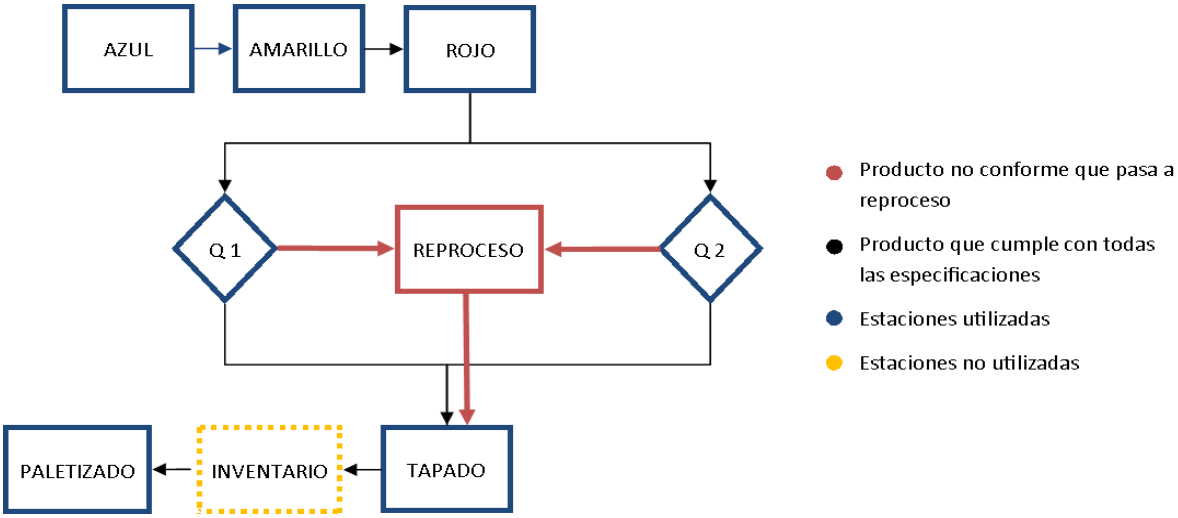
De esta manera se logra el adaptar el funcionamiento de la estructura a la celda, en donde los productos defectuosos una vez una vez cumplan con las especificaciones serán reincorporados nuevamente al proceso de producción.

También cabe aclarar que durante las prácticas ejecutadas en la celda, no se utilizó de la estación de inventario dado que su uso fue tenido en cuenta para una de las estructuras posteriores.

2.2.1.2 Estructura de reproceso B: La figura 21 representa la implementación de la estructura B a la celda Has-200. De igual manera al anterior caso, se plantea la idea de contar con solo una estación de reproceso para ambos controles de calidad. La diferencia con la estructura de tipo A radica en el ruteo que deben realizar los productos enviados al reproceso.

Los productos defectuosos una vez son identificados en las estaciones de calidad, son remitidos a la estación de reproceso para corregir las no conformidades, una vez son reprocesados pasan directamente al siguiente proceso, es decir a la estación de tapado. Para este caso, los productos reprocesados no ingresan a las estaciones de calidad para ser revisados nuevamente, por consiguiente no se verifica si los errores presentados fueron corregidos del todo.

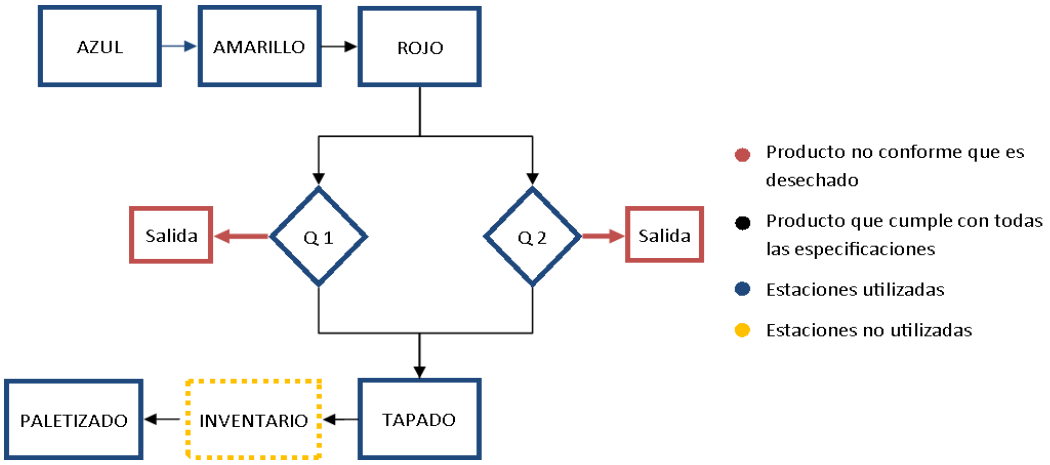
Figura 21. Estructura de reproceso B adaptada a la celda Has-200



Fuente: Autoras (2017)

2.2.1.3 Estructura de reproceso C: Esta estructura expuesta por los autores, consiste en desechar de forma inmediata los productos cuando estos no cumplen con las especificaciones, es decir no se realizan actividades adicionales para intentar repararlo (Ver figura 22). Con estas características se puede afirmar que este es el modelo que maneja actualmente la HAS-200, si algún producto no pasa la inspección, las estaciones de calidad desechan de forma automática estos productos.

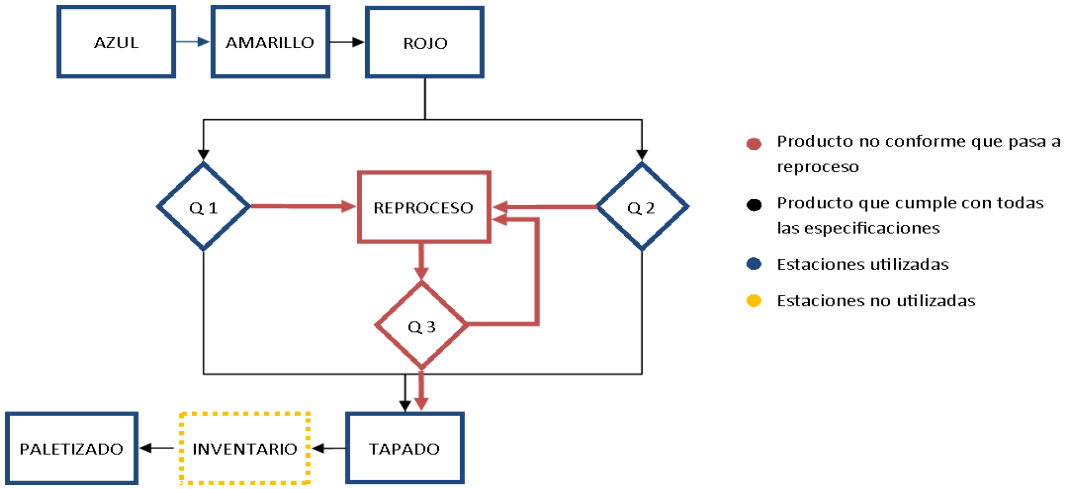
Figura 22. Estructura de reproceso C adaptada a la celda Has-200



Fuente: Autoras (2017)

2.2.1.4 Estructura de reproceso D: Esta estructura de reproceso se diferencia de las anteriores en cuanto al uso de una estación de calidad adicional a las existentes. La figura 23 permite visualizar el modelo de esta estructura, donde los productos defectuosos una vez son reprocesados pasan a un tercer módulo de calidad, el cual se encuentra en funcionamiento de forma paralela a los existentes. Esto garantiza que el nuevo módulo de inspección se encargue de revisar solamente los productos que han sido reprocesados, logrando de esta manera reducir los niveles de trabajo en las otras dos estaciones de calidad.

Figura 23. Estructura de reproceso D adaptada a la celda Has-200



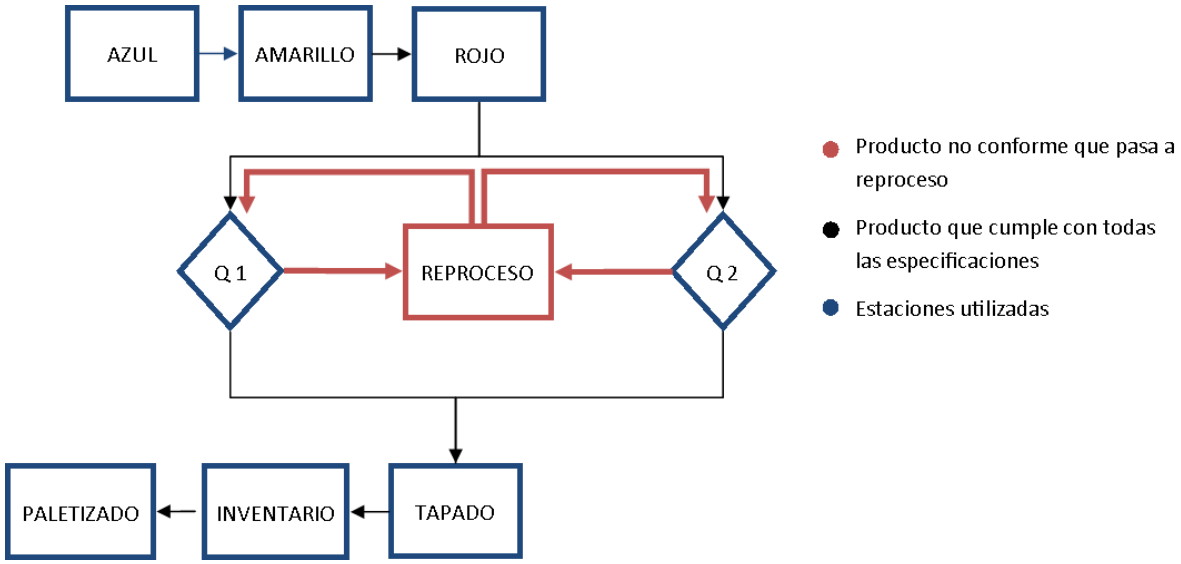
Fuente: Autoras (2017)

Se resalta también que los productos defectuosos que no pasen la inspección en este nuevo módulo, serán devueltos a la estación de reproceso para ser reparados nuevamente. De tal manera que el proceso de inspección será clico, hasta que los productos estén reparados completamente.

2.2.1.5 Estructura de reproceso E: La estructura ***E*** propuesta por los autores**,** figura 24, sugiere el uso de una estación de almacenamiento. La misión de este almacenaje, es la de retener todos los productos hasta que la orden de producción se encuentre completa. Esto indica que los productos que pasaron la inspección de calidad por primera vez tendrán un tiempo de espera, hasta que los productos defectuosos sean reparados, logrando así que la final del proceso la orden sea despachada de forma continua.

Actualmente la celda Has-200 cuenta con una estación de almacenaje la cual puede cumplir con este proceso, de tal manera que no se hace necesario la adición de una nueva estación. Esta estructura cuenta con un funcionamiento similar a la estructura A, dado que los productos que no cumplan las especificaciones pasarán al reproceso y una vez reparados, irán de nuevo a la estación de calidad correspondiente para ser inspeccionados. La diferencia radica en que todos los productos de la orden serán almacenados en el módulo de inventario.

Figura 24. Estructura de reproceso E adaptada a la celda Has-200



Fuente: Autoras (2017)

Como se observa en los anteriores gráficos, a través de diagramas de flujo se estableció el actual funcionamiento de la celda y como cada una de las estructuras de reproceso expuestas por los autores en el artículo, podría llegar a funcionar dentro de la actual estructura con la que cuenta la celda.

2.3 DISEÑO DE LA SIMULACIÓN

2.3.1 Selección software de simulación**:** Hoy en día existen en el mercado paquetes de software con elementos gráficos predefinidos que facilitan la tarea del montaje de los diseños de los sistemas. Dado que la cantidad de plataformas disponibles para este tipo de tareas son muy diversas, la tabla 11 muestra una matriz de evaluación en la cual se realiza una comparación entre algunas de las plataformas de simulación utilizadas hoy en día en el mercado, esto a fin seleccionar el programa con el cual se llevara a cabo el desarrollo del proyecto.

Tabla 11. Comparación softwares de Simulación

VARIABLES	ProModel	**Valor**	Simio Forward Thinking	**Valor**	FlexSim	**Valor**
Interfaz gráfica	Regular	3	Buena	4.5	Excelente	5
Facilidad en diseño de proceso lógico	Baja	3	Alta	5	Alta	5
Facilidad en análisis de resultados	Baja	3	Media	4	Media	4
Programa ajuste de distribuciones	Si cuenta	5	No cuenta	0	No cuenta	0
Licenciamiento	No	0	Si	5	No	0
Nivel de manejo del programa	Regular	3	Bueno	4.5	Bajo	2
	TOTAL	**17**	**TOTAL**	**23**	**TOTAL**	**16**

Fuente: Autoras (2017)

Promodel, Simio y Flexsim son solo algunas de las muchas plataformas disponibles para realizar simulaciones discretas. El criterio de decisión para realizar la comparación de estas plataformas y no otras, radica en que los tres programas han sido manejados tanto por las autoras del proyecto como por el director, por consiguiente se cuenta con un conocimiento previo sobre el comportamiento de cada uno de los programas expuestos.

La comparación de los tres software se realizó en base a seis variables, las cuales resumen el criterio de selección del software a utilizar para el desarrollo de simulación de la celda.

- Interfaz gráfica: Visualmente las imágenes prediseñadas con las que cuenta Promodel no son tan realistas y llamativas como las tiene Simio o Flexsim. Adicional a esto la gran mayoría de versiones de Promodel no cuentan con la posibilidad de visualizar la simulación en tercera dimensión, por tanto los modelamientos son planos.

- Facilidad en diseño de proceso Lógico: Simio y Flexsim cuentan con una plataforma más amigable para el diseño de los sistemas a modelar. Es sencillo establecer las relaciones entre cada uno de los procesos y realizar cambios en las configuraciones de operarios, maquinas, productos etc. La identificación de errores es más específica, ya que tienen la capacidad de determinar exactamente en qué parte de la configuración se encuentran, característica que Promodel no posee, este al identificar un error lo notifica pero no anuncia en que parte del proceso se encuentra.

- Facilidad en análisis de resultados: los resultados arrojados por los tres software son relativamente fáciles de interpretar en la medida que estos son mostrados en formas de tablas, por consiguiente la identificación de valores se convierte en una tarea sencilla. Sin embargo se requiere de cierto grado de experticia para lograr identificar el significado de cada una de las variables que muestran los resultados.

- Programa ajuste de distribución: Promodel cuenta con un aplicativo llamado SatFit, el cual permite comparar los datos de la muestra con diferentes distribuciones de probabilidad arrojando como resultado cuales de estas se ajustan mejor al comportamiento de los datos ingresados al aplicativo. Actualmente Simio y Flexsim no cuentan con esta característica, por lo que se hace necesario hacer uso de herramientas externas a los programas que permitan determinar las distribuciones probabilísticas de cada uno de los procesos a simular.

- Licenciamiento: La Universidad Libre actualmente cuenta con licenciamiento sobre el programa de simulación Simio, por lo tanto el software se encuentra disponible para uso de la comunidad en los ordenadores de las salas de sistemas. Adicional a esto brinda el beneficio a los estudiantes de obtener la licencia para descarga del programa en ordenadores personales a muy bajo costo. La universidad no cuenta con licencias ni beneficios para Promodel y Flexsim, lo cual implica comprar licencias como personas particulares, pero los costos de estas son altos.

- Nivel de manejo del programa: Como se mencionó con anterioridad, el equipo de trabajo ha usado los tres programas de simulación y a partir de esto se puede establecer que el programa del que se cuenta más conocimiento es Simio, esto dado que el director de trabajo ha desarrollado varios proyectos de grado haciendo uso de este programa.

Teniendo en cuenta los aspectos analizados para cada una de las variables de decisión, se dio una calificación de 1 a 5 a cada una de ellas a fin de lograr obtener una valoración numérica, que permitiera seleccionar el programa a trabajar para el desarrollo de este proyecto. Bajo este escenario el programa que conto con una mayor calificación fue SIMIO, siendo este el software con el cual se realizó la simulación.

2.3.2 Diseño y funcionamiento de la celda en SIMIO: Simio es un software de modelado el cual permite construir y ejecutar simulaciones en animación 3D para una amplia gama de sistemas como: Fábricas, cadenas de suministro, departamentos de emergencias, aeropuertos y cualquier sistema de servicios. En el Anexo 9-Funcionamiento de SIMIO se muestran algunas configuraciones del software para una mejor comprensión del tema.

Como se mencionó en la descripción del problema, se realizó un muestreo estadístico en la celda Has 200 con el objetivo de analizar la cantidad de productos defectuosos que se generaban en varias corridas de producción. Estas corridas también fueron ejecutadas para caracterizar el funcionamiento de esta herramienta, por consiguiente fue realizado un estudio de tiempos para lograr establecer la duración de cada uno de los procesos que se llevan a cabo allí. Los tiempos tomados pueden ser visualizados en el Anexo 1-Corridas de producción.

Para ejecutar simulaciones, los tiempos de proceso o servicio deben estar determinados en función de una distribución de probabilidad. Estas distribuciones se determinan a partir de histogramas que muestran el comportamiento de los datos tomados y con base a esto lograr identificar la distribución que mejor se adapte a estos.

Bajo esta condición, se procedió a determinar las distribuciones de probabilidad de los procesos que se llevan a cabo en cada una de las estaciones de la celda. Para este paso se utilizó el aplicativo StatFit del software Promodel, el cual permite ingresar un listado de datos y este realiza de forma automática el ajuste de diferentes probabilidades, arrojando como resultado la función de distribución de aquellas que contaron con un mayor porcentaje de ajuste. Antes de ingresar los tiempos de proceso al StatFit se realizó un análisis de estos, dado que se encontraron datos atípicos que podían generar variabilidad en los resultados. Estos datos atípicos no se tuvieron en cuenta al momento de ingresar los datos al software.

Para determinar los datos atípicos de cada grupo de datos, se hace necesario determinar ciertas variables como la mediana de los datos, los cuartiles y el rango intercuartílico. Se presenta entonces los cálculos necesarios para determinar estos valores y para ello se tomará como ejemplo los tiempos registrados para los productos multicolores.

a) El primer paso, consiste en calcular las frecuencias con las que se repiten cada uno de los datos. La tabla 12 presenta los diferentes tiempos de proceso para la estación multicolor con sus respectivas frecuencias y valores acumulados.

Tabla 12. Frecuencias tiempos de proceso para estación Multicolor

TIEMPOS DE PROCESO EN SEGUNDOS	FRECUENCIA	ACUMULADO
13	1	1
14	1	2
15	1	3
17	1	4
18	4	8
19	6	14
20	5	19
21	3	22
22	16	38
23	11	49
24	9	58
25	1	59

Fuente: Autoras (2017)

b) La segunda parte del procedimiento consiste en aplicar formulas estadísticas que nos permiten determinar todos los valores previamente mencionados. La tabla 13 muestra una relación de los cálculos realizados.

Tabla 13. Cálculo de Mediana, cuartiles y rango intercuartílico

MEDIANA	CUARTIL 1	CUARTIL 3	RANGO INTERCUARTÍLICO
La mediana equivale al valor central de los datos tomados, para su cálculo se aplica la fórmula 10, la cual consiste en dividir el total de datos en dos: Fórmula 10. Cálculo de la mediana $\boldsymbol{Me} = \frac{\boldsymbol{N}}{\mathbf{2}} \rightarrow \frac{\mathbf{59}}{\mathbf{2}} = \mathbf{29.5}$. Fuente: Calle (2012) Este resultado será buscado en la tabla 12, en los valores acumulados. Se buscara el primer valor que sobrepase el 29.5, que para este caso correspondería al número 38. Esto indica que 22 es el valor de la mediana de los datos ingresados	El cuartil 1 permite determinar hasta qué valor se encuentra el 25% de los datos registrados. Para su cálculo se hace necesario aplicar la fórmula 11, la cual consiste en dividir el total de datos en 4: Fórmula 11. Cálculo del cuartil 1 $\mathrm{Q}_1 = \frac{\mathrm{N}}{4} \rightarrow \frac{59}{4} = 14.75$ Fuente: Calle (2012) De igual manera, nos dirigimos a los valores acumulados de la tabla 12 y se identifica el primer valor que sobrepase el 14.75. Este número corresponde al 19, por consiguiente el cuartil 1 (Q1) equivale a 20	El cuartil 3 permite determinar hasta qué valor se encuentra el 75% de los datos registrados. Para su cálculo se hace necesario aplicar la fórmula 12, la cual consiste en dividir el total de datos en 4 y multiplicar por tres: Fórmula 12. Cálculo cuartil 3 $. \mathrm{Q}_3 = 3\frac{\mathrm{N}}{4} \rightarrow 3\ \frac{59}{4} = 44.25$ Fuente: Calle (2012) Al buscar el primer número mayor a 44.25 en los datos acumulados, se encuentra que este valor corresponde a 29, de tal manera el tercer cuartil (Q3) corresponde a 23	El rango intercuartílico se define como una medida que permite determinar el grado de dispersión de datos estadísticos. De acuerdo con la fórmula 13, este consiste en determinar la diferencia entre el tercer cuartil y el primero: Fórmula 13. Cálculo rango intercuartílico $\mathrm{R}_i = Q_3 - Q_2$ Fuente: Calle (2012) El rango intercuartílico para los tiempos de proceso de la estación multicolor. Corresponde a 3, dado que Q3 equivale a 23 y Q1 a 20.

Fuente: Autoras (2017)

c) Finalmente a través de la fórmula 14, es posible determinar los valores atípicos de la lista de datos.

Fórmula 14. Calculo de datos atípicos

$$\gamma_1 = Q_1 - 1.5R_1 \rightarrow 20 - 1.5 * 3 = 16$$

$$\gamma_2 = Q_2 + 1.5R_2 \rightarrow 23 + 1.5 * 3 = 28$$

Fuente: Calle (2012)

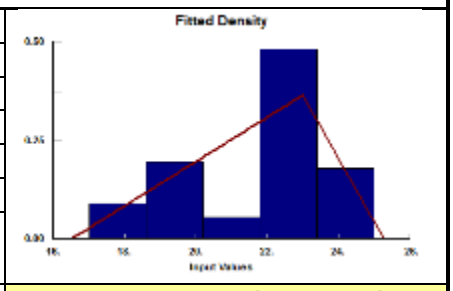
Estos resultados indican que todos los valores antes del 16 y después del 28 serán considerados atípicos, por consiguiente no serán tenidos en cuenta para posteriores análisis. De esta manera los registros que cuentan con tiempos de 13, 14, 15 y 25 segundos son datos atípicos.

A continuación la tabla 14 presenta una relación de los tiempos de proceso para cada una de las estaciones junto con sus respectivos cálculos para determinar los datos atípicos, los cuales se encuentran señalados con color rojo. Se muestra también la función de distribución, resultado del análisis realizado en el Statfit una vez fueron ingresados los datos correctos.

Tabla 14. Distribuciones de probabilidad para estaciones de llenado

ESTACIÓN	TIEMPO											
MULTICOLOR	1	22	11	23	21	22	31	15	41	23	51	22
	2	24	12	23	22	24	32	22	42	24	52	20
	3	24	13	23	23	19	33	22	43	20	53	22
	4	14	14	13	24	22	34	22	44	21	54	22
	5	22	15	18	25	22	35	19	45	24	55	19
	6	24	16	19	26	23	36	21	46	23	56	24
	7	23	17	19	27	20	37	23	47	20	57	22
	8	24	18	19	28	22	38	18	48	18	58	22
	9	23	19	23	29	20	39	17	49	21	59	24
	10	25	20	22	30	23	40	22	50	18		

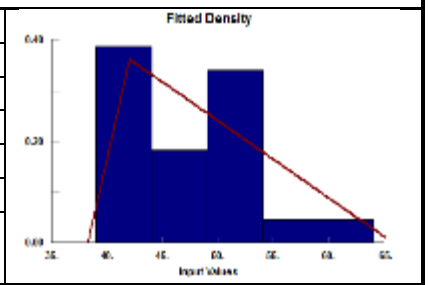
Mediana	22
Q1	20
Q2	23
Ri	3
F1	16
F2	28
Total datos	59
Datos StatFit	56



TRIANGULAR (17, 22, 25)

ESTACIÓN	TIEMPOS									
LLENADO AZUL 15 GR	1	57	11	44	21	40	31	52	41	64
	2	45	12	49	22	42	32	52	42	44
	3	56	13	51	23	43	33	43	43	42
	4	64	14	52	24	42	34	86	44	49
	5	43	15	43	25	39	35	52	45	41
	6	53	16	42	26	48	36	44		
	7	50	17	42	27	41	37	51		
	8	44	18	42	28	50	38	52		
	9	43	19	43	29	48	39	52		
	10	52	20	43	30	44	40	51		

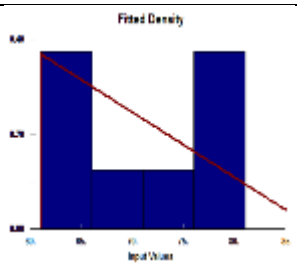
Mediana	45
Q1	43
Q2	52
Ri	9
F1	30
F2	66
Total datos	45
Datos StatFit	44



TRIANGULAR (39, 43, 64)

ESTACIÓN	TIEMPOS							
LLENADO AZUL 30 GR	1	76	6	63	11	78	16	63
	2	140	7	80	12	69	17	81
	3	80	8	66	13	61		
	4	75	9	80	14	63		
	5	64	10	73	15	64		

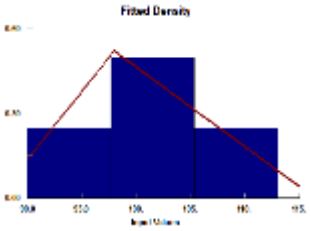
Mediana	73
Q1	64
Q2	80
Ri	16
F1	40
F2	104
Total datos	17
Datos StatFit	16



TRIANGULAR (61, 80, 81)

ESTACIÓN	TIEMPOS					
LLENADO AZUL 45 GR	1	92	6	99	11	99
	2	97	7	98	12	90
	3	106	8	104	13	98
	4	110	9	96		
	5	113	10	99		

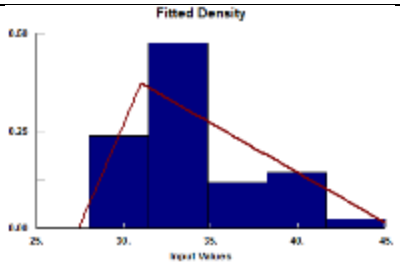
Mediana	99
Q1	97
Q2	104
Ri	7
F1	87
F2	114
Total datos	13
Datos StatFit	13



TRIANGULAR (90, 99, 113)

ESTACIÓN	TIEMPOS									
LLENADO AMARILLO 15 GR	1	32	11	39	21	32	31	143	41	32
	2	39	12	33	22	170	32	33	42	39
	3	34	13	31	23	32	33	38	43	38
	4	45	14	32	24	38	34	31	44	39
	5	33	15	32	25	32	35	39	45	33
	6	33	16	33	26	31	36	32		
	7	32	17	32	27	28	37	29		
	8	38	18	30	28	32	38	37		
	9	39	19	32	29	32	39	31		
	10	67	20	30	30	31	40	29		

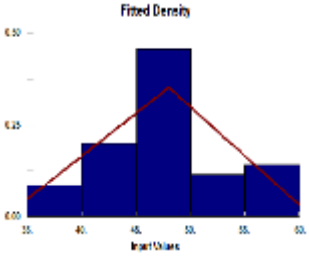
Mediana	32
Q1	32
Q2	38
Ri	6
F1	23
F2	47
Total datos	45
Datos StatFit	42



TRIANGULAR (28, 32, 45)

ESTACIÓN	TIEMPOS							
LLENADO AMARILLO 30 GR	1	56	11	49	21	49	31	49
	2	76	12	48	22	51	32	48
	3	60	13	147	23	56	33	48
	4	64	14	35	24	36	34	49
	5	49	15	48	25	36	35	43
	6	56	16	40	26	51	36	43
	7	50	17	48	27	55	37	48
	8	50	18	43	28	47	38	47
	9	42	19	48	29	42		
	10	42	20	49	30	48		

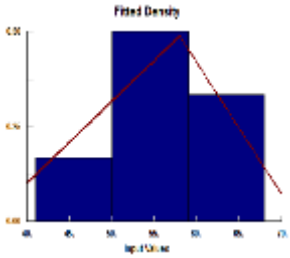
Mediana	48
Q1	44
Q2	51
Ri	7
F1	34
F2	61
Total datos	38
Datos StatFit	35



TRIANGULAR (35, 48, 60)

ESTACIÓN	TIEMPO					
LLENADO AMARILLO 45 GR	1	52	6	58	11	50
	2	68	7	60	12	41
	3	58	8	52	13	41
	4	97	9	59		
	5	58	10	67		

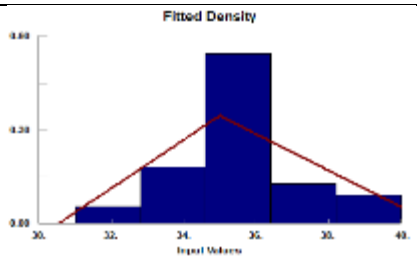
Mediana	58
Q1	52
Q2	60
Ri	8
F1	40
F2	72
Total datos	13
Datos StatFit	12



TRIANGULAR (41, 58, 68)

ESTACIÓN	TIEMPOS													
LLENADO ROJO 15 GR	1	38	11	36	21	38	31	40	41	36	51	33	61	35
	2	40	12	37	22	34	32	39	42	34	52	34		
	3	35	13	43	23	33	33	37	43	35	53	36		
	4	42	14	36	24	34	34	36	44	36	54	36		
	5	37	15	36	25	34	35	35	45	35	55	35		
	6	36	16	40	26	35	36	35	46	35	56	5		
	7	36	17	38	27	36	37	35	47	35	57	36		
	8	38	18	40	28	32	38	35	48	34	58	36		
	9	42	19	36	29	31	39	36	49	43	59	35		
	10	36	20	34	30	42	40	34	50	31	60	36		

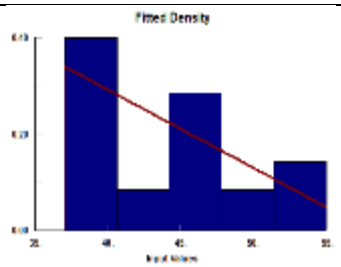
Mediana	36
Q1	35
Q2	37
Ri	3
F1	31
F2	41
Total datos	61
Datos StatFit	53



TRIANGULAR (31, 36, 40)

ESTACIÓN	TIEMPOS							
LLENADO ROJO 30 GR	1	43	11	46	21	37	31	46
	2	44	12	45	22	39	32	37
	3	49	13	40	23	39	33	46
	4	55	14	45	24	39	34	45
	5	54	15	45	25	40	35	40
	6	53	16	40	26	40		
	7	48	17	54	27	50		
	8	39	18	54	28	40		
	9	38	19	44	29	45		
	10	45	20	47	30	38		

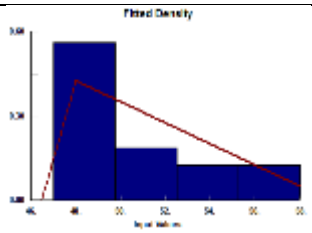
Mediana	45
Q1	40
Q2	47
Ri	7
F1	30
F2	56
Total datos	35
Datos StatFit	35



TRIANGULAR (37, 45, 55)

ESTACIÓN	TIEMPOS							
LLENADO ROJO 45 GR	1	55	6	54	11	50	16	47
	2	48	7	50	12	58		
	3	49	8	49	13	56		
	4	49	9	48	14	49		
	5	52	10	49	15	49		

Mediana	49
Q1	49
Q2	53
Ri	4
F1	44
F2	58
Total datos	16
Datos StatFit	16



TRIANGULAR (47, 49, 58)

Fuente: Autoras (2017)

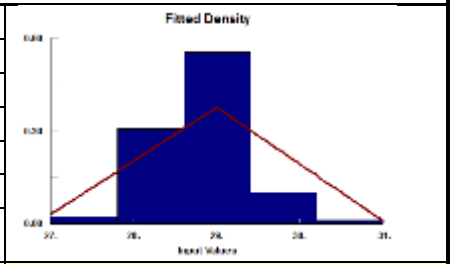
Los anteriores análisis realizados corresponden a los procesos de las estaciones de llenado. Se realizaron por separado dependiendo del tipo de gramaje, dado que los tiempos de llenado para cada bote serán diferentes si este de 15, 30 o 45 gr.

La tabla 15 corresponde al análisis de los tiempos de las estaciones de calidad, tapado y paletizado, los cuales se realizaron de forma general ya que en los tiempos de proceso no intervienen las variables de color o gramaje de cada bote. Las distribuciones de probabilidad de las últimas dos estaciones fueron calculadas haciendo uso de otro aplicativo llamado EasyFit, dado que el StatFit de Promodel solo permite ingresar un máximo de 100 datos. De igual manera fueron calculados datos atípicos y solo se ingresaron a aplicativo aquellos que se encontraran dentro de los rangos establecidos.

Tabla 15. Distribuciones de probabilidad para estaciones de calidad, tapado y paletizado

ESTACIÓN	TIEMPOS											
CALIDAD 1	1	28	21	29	41	29	61	29	81	12	101	29
	2	28	22	29	42	29	62	29	82	29	102	13
	3	29	23	29	43	30	63	30	83	30		
	4	29	24	36	44	28	64	29	84	29		
	5	36	25	29	45	43	65	28	85	29		
	6	29	26	28	46	31	66	28	86	29		
	7	14	27	28	47	28	67	30	87	30		
	8	29	28	28	48	30	68	29	88	50		
	9	29	29	30	49	29	69	29	89	28		
	10	29	30	28	50	28	70	27	90	29		
	11	28	31	29	51	28	71	23	91	36		
	12	29	32	29	52	29	72	30	92	29		
	13	50	33	29	53	28	73	29	93	28		
	14	29	34	30	54	29	74	28	94	29		
	15	27	35	29	55	28	75	29	95	28		
	16	36	36	28	56	29	76	28	96	29		
	17	29	37	28	57	29	77	29	97	28		
	18	28	38	29	58	29	78	33	98	29		
	19	29	39	29	59	28	79	29	99	19		
	20	28	40	32	60	28	80	29	100	29		

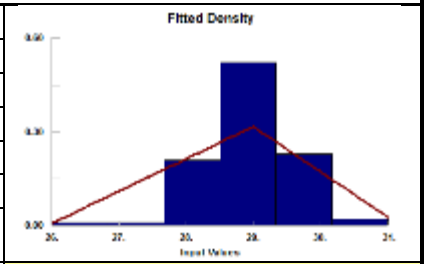
Mediana	29
Q1	28
Q2	29
Ri	1
F1	27
F2	31
Total datos	102
Datos StatFit	88



TRIANGULAR (27, 29, 31)

ESTACIÓN	TIEMPOS											
CALIDAD 2	1	30	21	29	41	29	61	30	81	19	101	29
	2	29	22	103	42	29	62	29	82	29	102	30
	3	26	23	108	43	29	63	28	83	30	103	13
	4	29	24	28	44	29	64	28	84	28	104	11
	5	30	25	29	45	29	65	29	85	29	105	28
	6	28	26	29	46	29	66	34	86	30	106	14
	7	28	27	28	47	29	67	27	87	28	107	15
	8	29	28	28	48	29	68	31	88	29		
	9	29	29	41	49	29	69	28	89	29		
	10	28	30	28	50	30	70	29	90	29		
	11	29	31	29	51	29	71	29	91	29		
	12	29	32	30	52	21	72	29	92	29		
	13	29	33	29	53	30	73	41	93	28		
	14	29	34	29	54	29	74	29	94	30		
	15	28	35	30	55	29	75	30	95	30		
	16	29	36	30	56	28	76	29	96	30		
	17	28	37	29	57	29	77	29	97	30		
	18	28	38	30	58	29	78	30	98	30		
	19	29	39	30	59	29	79	31	99	30		
	20	28	40	29	60	29	80	30	100	28		

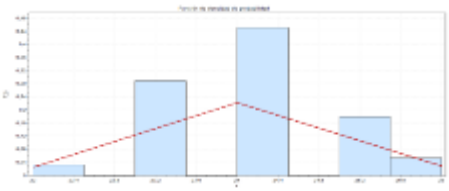
Mediana	29
Q1	28
Q2	30
Ri	2
F1	25
F2	33
Total datos	107
Datos StatFit	96



TRIANGULAR (26, 29, 31)

ESTACIÓN	TIEMPOS																					
TAPADO	1	24	21	25	41	23	61	23	81	24	101	23	121	23	141	24	161	89	181	24	201	23
	2	24	22	23	42	23	62	25	82	25	102	31	122	24	142	24	162	24	182	23	202	25
	3	24	23	24	43	23	63	23	83	24	103	24	123	25	143	23	163	23	183	23	203	22
	4	20	24	23	44	21	64	24	84	25	104	23	124	25	144	25	164	25	184	24	204	21
	5	24	25	25	45	26	65	24	85	24	105	24	125	26	145	24	165	22	185	23	205	24
	6	23	26	23	46	24	66	19	86	24	106	25	126	22	146	25	166	23	186	24	206	26
	7	23	27	24	47	24	67	23	87	24	107	23	127	23	147	23	167	24	187	26	207	23
	8	24	28	24	48	20	68	24	88	22	108	24	128	24	148	32	168	23	188	26		
	9	24	29	24	49	23	69	24	89	25	109	24	129	16	149	32	169	23	189	25		
	10	25	30	24	50	24	70	25	90	23	110	24	130	23	150	23	170	24	190	25		
	11	23	31	23	51	24	71	23	91	24	111	24	131	26	151	23	171	24	191	25		
	12	23	32	19	52	25	72	25	92	24	112	24	132	24	152	24	172	19	192	24		
	13	25	33	24	53	24	73	25	93	24	113	24	133	26	153	24	173	25	193	24		
	14	24	34	32	54	23	74	24	94	24	114	24	134	25	154	24	174	24	194	24		
	15	24	35	24	55	23	75	23	95	24	115	23	135	25	155	23	175	23	195	23		
	16	24	36	24	56	24	76	20	96	24	116	52	136	24	156	23	176	24	196	24		
	17	24	37	24	57	24	77	24	97	23	117	23	137	25	157	25	177	23	197	26		
	18	23	38	24	58	24	78	25	98	24	118	24	138	22	158	23	178	25	198	24		
	19	23	39	23	59	24	79	25	99	23	119	24	139	28	159	24	179	24	199	22		
	20	23	40	26	60	24	80	25	100	25	120	23	140	26	160	25	180	25	200	23		

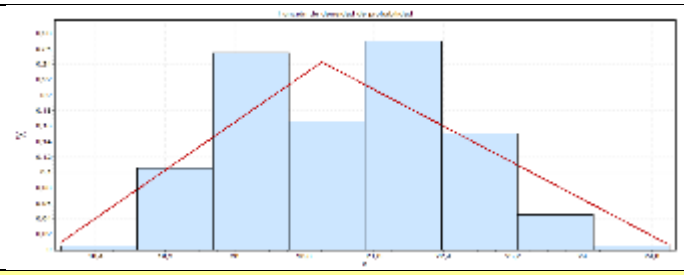
Mediana	24
Q1	23
Q2	24
Ri	1
F1	22
F2	26
Total datos	207
Datos StatFit	191



TRIANGULAR (22, 24, 26)

ESTACIÓN	TIEMPOS																					
PALETIZADO	1	20	21	20	41	23	61	24	81	21	101	22	121	20	141	22	161	20	181	20	201	24
	2	19	22	20	42	22	62	22	82	22	102	19	122	23	142	23	162	20	182	20	202	21
	3	21	23	60	43	20	63	20	83	22	103	19	123	21	143	22	163	19	183	22	203	23
	4	20	24	23	44	21	64	20	84	21	104	19	124	14	144	23	164	22	184	21	204	22
	5	21	25	22	45	23	65	21	85	20	105	21	125	21	145	22	165	22	185	22	205	22
	6	20	26	22	46	20	66	16	86	25	106	20	126	20	146	27	166	22	186	20	206	22
	7	20	27	21	47	18	67	20	87	23	107	20	127	22	147	19	167	20	187	20		
	8	20	28	20	48	22	68	23	88	21	108	22	128	23	148	21	168	20	188	19		
	9	20	29	22	49	23	69	23	89	19	109	23	129	23	149	19	169	23	189	21		
	10	19	30	32	50	19	70	21	90	21	110	19	130	22	150	21	170	23	190	23		
	11	21	31	22	51	21	71	19	91	28	111	21	131	22	151	24	171	23	191	22		
	12	23	32	19	52	23	72	20	92	20	112	23	132	20	152	23	172	21	192	24		
	13	22	33	20	53	21	73	20	93	20	113	22	133	21	153	22	173	21	193	22		
	14	22	34	20	54	20	74	20	94	21	114	22	134	21	154	22	174	19	194	24		
	15	22	35	22	55	19	75	19	95	21	115	23	135	23	155	22	175	19	195	23		
	16	20	36	24	56	20	76	23	96	20	116	20	136	20	156	22	176	22	196	20		
	17	22	37	22	57	21	77	22	97	20	117	20	137	22	157	24	177	22	197	20		
	18	22	38	22	58	20	78	21	98	19	118	22	138	22	158	22	178	23	198	19		
	19	22	39	23	59	22	79	20	99	23	119	22	139	22	159	24	179	23	199	21		
	20	21	40	20	60	20	80	21	100	22	120	22	140	24	160	19	180	20	200	20		

Mediana	21
Q1	20
Q2	22
Ri	2
F1	17
F2	25
Total datos	206
Datos StatFit	200



TRIANGULAR (17, 21, 25)

Fuente: Autoras (2017)

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta para los procesos de simulación, son los tiempos entre llegadas, esta variable permite determinar cada cuanto tiempo está ingresando una nueva entidad al sistema para ser procesada. Estos tiempos son tomados haciendo uso de un cronometro en el que se da vuelta a cero cada que llega una nueva entidad al sistema, de esta manera la diferencia de tiempo entre un registro y el otro determina cuanto tiempo pasó para que una nueva entidad ingrese al sistema desde que había ingresado la última. Por consiguiente es correcto afirmar que para determinar los tiempos entre llegadas de las entidades, es necesario realizar la toma de datos en una sola sesión.

Dado que las corridas en la celda fueron ejecutadas por separado y no se contó con un registro de tiempo recorrido que permitiera determinar cada cuanto se iniciaba un nueva orden de producción,

fue necesario crear un reloj el cual permitiera determinar a partir de qué momento ingresaban nuevas órdenes al sistema. La simulación del reloj se realizó dependiendo del tiempo de producción del último bote elaborado de la orden inmediatamente anterior. En el Anexo1-Corridas de producción, es posible visualizar los tiempos de inicio de fabricación de cada uno de los botes, el reloj realizado y el tiempo de inicio de producción teniendo en cuenta el reloj. La tabla 16, muestra los tiempos entre llegadas calculados a partir de los anteriores registros mencionados, junto con su respectiva distribución de probabilidad. Cabe aclarar que los tiempos entre llegadas no cuentan con datos atípicos ya que las llegadas de las entidades es una variable independiente, por consiguiente no se puede controlar.

Tabla 16. Tiempos entre llegadas

TIEMPO ENTRE LLEGADAS	TIEMPO																					
	1	7	**21**	3	**41**	4	**61**	57	**81**	30	**101**	14	**121**	0	**141**	1	**161**	30	**181**	170	**201**	66
	2	3	**22**	50	**42**	33	**62**	11	**82**	16	**102**	64	**122**	70	**142**	70	**162**	31	**182**	2	**202**	10
	3	48	**23**	57	**43**	197	**63**	145	**83**	2	**103**	91	**123**	37	**143**	9	**163**	162	**183**	49	**203**	57
	4	20	**24**	9	**44**	0	**64**	17	**84**	2	**104**	73	**124**	73	**144**	60	**164**	62	**184**	9	**204**	21
	5	60	**25**	0	**45**	4	**65**	0	**85**	60	**105**	109	**125**	32	**145**	23	**165**	68	**185**	44	**205**	47
	6	92	**26**	2	**46**	53	**66**	6	**86**	12	**106**	9	**126**	32	**146**	174	**166**	29	**186**	18	**206**	62
	7	64	**27**	47	**47**	53	**67**	45	**87**	51	**107**	2	**127**	9	**147**	31	**167**	215	**187**	47	**207**	29
	8	12	**28**	17	**48**	10	**68**	32	**88**	59	**108**	218	**128**	1	**148**	11	**168**	32	**188**	13	**208**	33
	9	2	**29**	11	**49**	2	**69**	8	**89**	29	**109**	4	**129**	13	**149**	28	**169**	8	**189**	6	**209**	68
	10	1	**30**	33	**50**	2	**70**	19	**90**	206	**110**	54	**130**	28	**150**	180	**170**	3	**190**	4	**210**	1
	11	47	**31**	22	**51**	46	**71**	32	**91**	58	**111**	59	**131**	214	**151**	3	**171**	24	**191**	51	**211**	2
	12	4	**32**	182	**52**	12	**72**	25	**92**	11	**112**	53	**132**	5	**152**	32	**172**	10	**192**	17	**212**	51
	13	46	**33**	32	**53**	66	**73**	18	**93**	7	**113**	66	**133**	65	**153**	39	**173**	3	**193**	1	**213**	13
	14	52	**34**	10	**54**	13	**74**	2	**94**	150	**114**	66	**134**	5	**154**	185	**174**	60	**194**	59	**214**	45
	15	92	**35**	0	**55**	9	**75**	55	**95**	1	**115**	30	**135**	65	**155**	144	**175**	3	**195**	8	**215**	14
	16	179	**36**	32	**56**	31	**76**	15	**96**	64	**116**	12	**136**	13	**156**	66	**176**	68	**196**	57	**216**	10
	17	8	**37**	208	**57**	175	**77**	43	**97**	1	**117**	0	**137**	68	**157**	69	**177**	4	**197**	153	**217**	53
	18	8	**38**	3	**58**	4	**78**	63	**98**	20	**118**	26	**138**	60	**158**	10	**178**	62	**198**	9	**218**	31
	19	24	**39**	69	**59**	66	**79**	74	**99**	1	**119**	40	**139**	15	**159**	2	**179**	14	**199**	148	**219**	159
	20	201	**40**	99	**60**	75	**80**	62	**100**	51	**120**	182	**140**	1	**160**	77	**180**	5	**200**	0		
	POISSON(46)																					

Fuente: Autoras (2017)

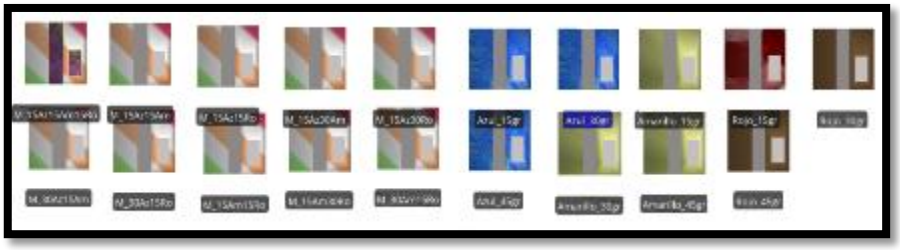
La distribución de probabilidad para los arribos fue determinada como una función de tipo Poisson con una media de 46. Este tipo de distribución permite determinar la probabilidad de ocurrencia de cierta cantidad de eventos en un espacio de tiempo determinado, por consiguiente al utilizar esta distribución para los arribos del sistema, se indica que en una hora ingresan 46 botes en promedio.

Una vez analizados los datos y habiendo establecido las distribuciones de probabilidad de los mismos, se procedió a realizar el montaje del sistema en la plataforma del software

a) Entidades: Como se mencionó con anterioridad, la celda cuenta con la posibilidad de fabricar un total de 19 productos que varían de color y gramaje. Bajo esta condición como se

observa en la figura 25, fueron creadas 19 entidades diferentes las cuales representan cada uno de los posibles botes que pueden ser procesados en la celda.

Figura 25. Entidades de la celda de manufactura



Fuente: Autoras (2017)

b) Source (entradas): La programación de las entradas de estos productos se configuro a través de un solo objeto. Simio cuenta con la posibilidad de configurar el comportamiento del sistema por medio de tablas, de esta manera las entradas de las entidades al sistema se configuraron ingresando una tabla de 2 x 19. En esta se listaron los 19 productos diferentes y a cada uno de ellos le fue asignado un porcentaje, el cual representa la cantidad de botes que llegaran al sistema de este tipo de producto.

La figura 26, permite visualizar la tabla que fue ingresada a Simio. Los porcentajes allí registrados fueron determinados dependiendo la cantidad de cada tipo de producto que fue procesado en las corridas realizadas en la celda. De esta manera si se toma como ejemplo el primer producto de la tabla, el cual corresponde a un bote multicolor de 15 gr amarillo y 15 gr rojo, se está indicando al software que el 7% de los botes que llegan a ser procesados en la celda debe ser de este tipo de producto.

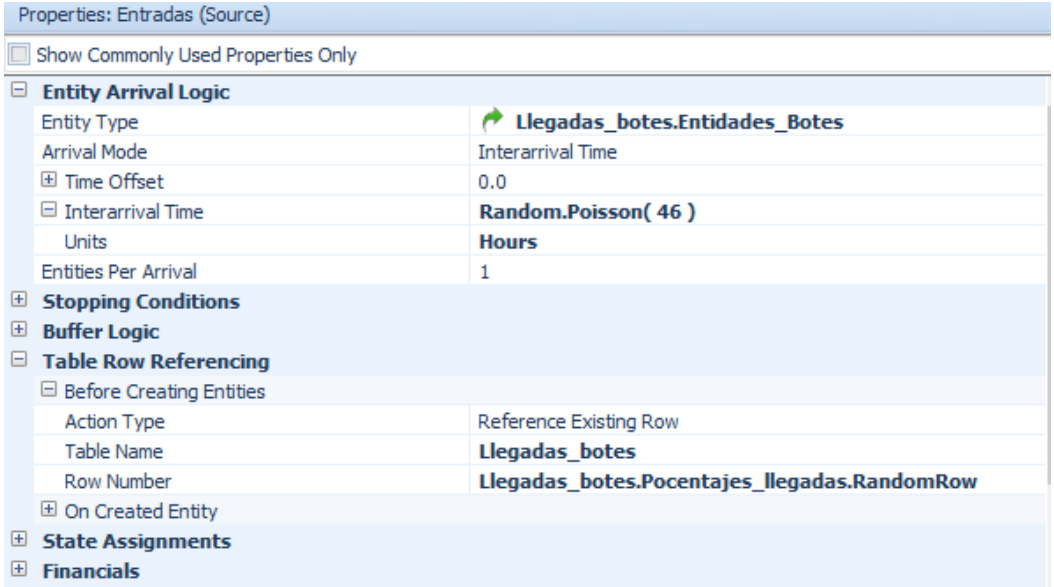
Figura 26. Tabla programación llegadas de entidades

2	M_15Am30Ro	3
3	M_15Az15Am	1
4	M_15Az15Am15Ro	4
5	M_15Az15Ro	2
6	M_15Az30Am	2
7	M_15Az30Ro	3
8	M_30Am15Ro	5
9	M_30Az15Am	1
10	M_30Az15Ro	1
11	Amarillo_15gr	5
12	Amarillo_30gr	11
13	Amarillo_45gr	5
14	Azul_15gr	9
15	Azul_30gr	5
16	Azul_45gr	6

Fuente: Autoras

La tabla de la figura 26 fue enlazada a las configuraciones del Source a través de su panel de propiedades, este enlace permitió indicarle al software que las entidades entrantes al sistema fueran creadas a partir de los porcentajes establecidos en la tabla. Adicional a esto se ingresó la distribución de probabilidad hallada en la sección anterior, la cual permite determinar el comportamiento de las llegadas al sistema. De esta manera en el panel de propiedades para el Source quedo tal y como se muestra en la figura 27.

Figura 27. Panel de propiedades para las entradas

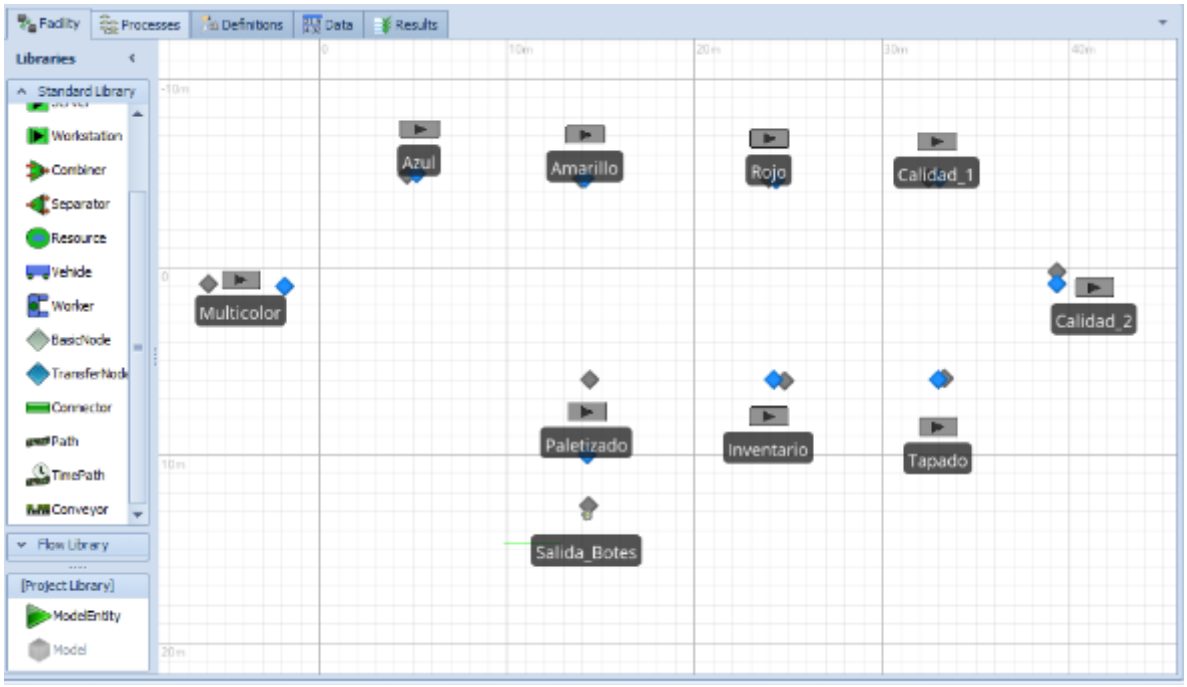


Fuente: Autoras (2017)

En la sección Entity Arrival Logic, se realizaron dos configuraciones: la primera de ellas en el apartado Entity Type, en la cual se relacionó la tabla de la figura 26, indicando de esta manera que las llegadas de las entidades se hicieran en base a la información suministrada por la tabla. La segunda configuración se realizó en el apartado Interarrival Time, en la cual se registró la distribución de probabilidad para los tiempos entre llegadas. Finalmente en la sección Table Row Referencing en el Apartado Row Number se indicio que de la tabla relacionada en el Entity Type, se debía hacer lectura de la columna Porcentajes, adicionando la expresión RandomRow se indicó al software que estas llegadas debían ser de tipo aleatoria.

c) Servidores: Se ubicaron en posición modular 9 servidores los cuales fueron renombrados como: Multicolor, Azul, Amarillo, Rojo, Calidad1, Calidad2, Tapado, Inventario y Paletizado. (Ver figura 28). La estación de reciclaje no fue tenida en cuenta dado que los productos no realizan algún tipo de proceso en esta estación. De igual manera el Output del Source fue unido al Input de las estación Multicolor, Azul, Amarillo y Rojo.

Figura 28. Servers del modelo



Fuente: Autoras (2017)

Se realizó una tabla en Excel (Ver tabla 17), la cual muestra las secuencias y distribuciones de probabilidad para cada producto en cada una de las estaciones. Dado que los posibles productos a fabricar en la celda varían en gramaje, las distribuciones de probabilidad que representan los tiempos de proceso, solo en las estaciones de llenado, dependerán de este factor.

En cuanto a las estaciones posteriores a las de llenado, es decir calidad, tapado, inventario y paletizado, los tiempos son estándar para todos los tipos de producto, ya que estas estaciones no diferencian los botes por su gramaje o color. De esta manera la tabla 17, muestra solo los procesos de los diferentes productos hasta la estación de llenado Rojo; tomando como ejemplo el primer producto, el cual corresponde a un bote de 15 gr amarillo y 15gr rojo, el primer proceso a realizar es en la estación multicolor, seguido pasará a la estación de llenado azul que de acuerdo al tipo de producto no realiza proceso en esta estación por consiguiente realiza una espera de 5 segundos, continua en la estación de llenado amarillo y finalmente en la estación de llenado rojo.

Tabla 17. Tiempos de proceso por producto para cada estación

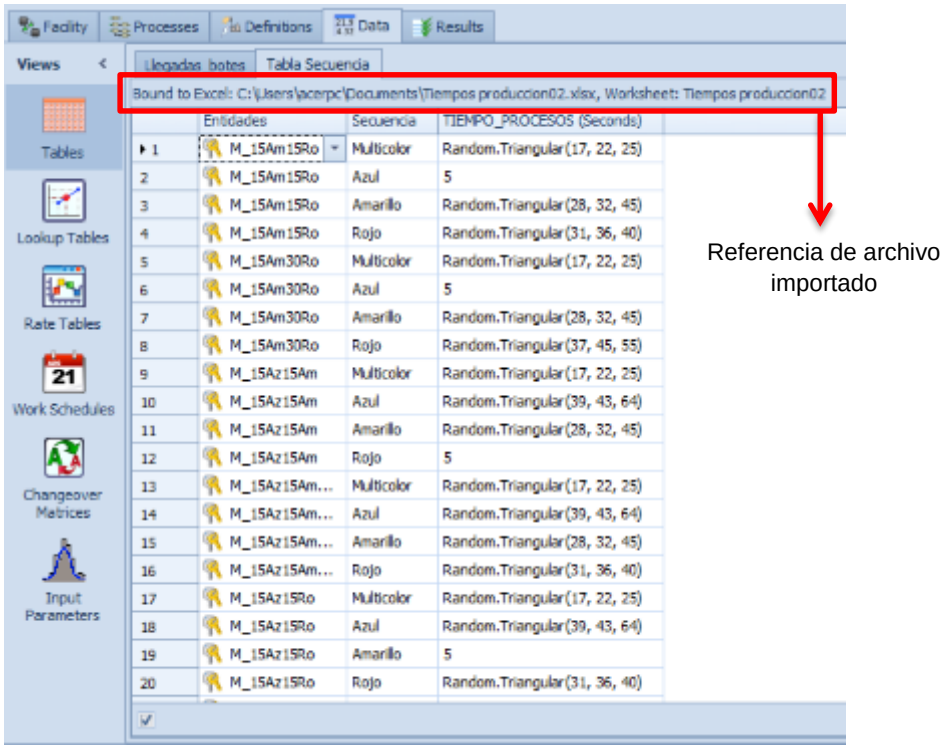
ENTIDADES	SECUENCIA	TIEMPO_PROCESOS
M_15Am15Ro	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_15Am15Ro	Azul	5
M_15Am15Ro	Amarillo	Random.Triangular(28, 32, 45)
M_15Am15Ro	Rojo	Random.Triangular(31, 36, 40)
M_15Am30Ro	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_15Am30Ro	Azul	5
M_15Am30Ro	Amarillo	Random.Triangular(28, 32, 45)
M_15Am30Ro	Rojo	Random.Triangular(37, 45, 55)
M_15Az15Am	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)

M_15Az15Am	Azul	Random.Triangular(39, 43, 64)
M_15Az15Am	Amarillo	Random.Triangular(28, 32, 45)
M_15Az15Am	Rojo	5
M_15Az15Am15Ro	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_15Az15Am15Ro	Azul	Random.Triangular(39, 43, 64)
M_15Az15Am15Ro	Amarillo	Random.Triangular(28, 32, 45)
M_15Az15Am15Ro	Rojo	Random.Triangular(31, 36, 40)
M_15Az15Ro	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_15Az15Ro	Azul	Random.Triangular(39, 43, 64)
M_15Az15Ro	Amarillo	5
M_15Az15Ro	Rojo	Random.Triangular(31, 36, 40)
M_15Az30Am	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_15Az30Am	Azul	Random.Triangular(39, 43, 64)
M_15Az30Am	Amarillo	Random.Triangular(35, 48, 60)
M_15Az30Am	Rojo	5
M_15Az30Ro	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_15Az30Ro	Azul	Random.Triangular(39, 43, 64)
M_15Az30Ro	Amarillo	5
M_15Az30Ro	Rojo	Random.Triangular(37, 45, 55)
M_30Am15Ro	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_30Am15Ro	Amarillo	Random.Triangular(35, 48, 60)
M_30Am15Ro	Rojo	Random.Triangular(31, 36, 40)
M_30Az15Am	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_30Az15Am	Azul	Random.Triangular(61, 80, 81)
M_30Az15Am	Amarillo	Random.Triangular(28, 32, 45)
M_30Az15Am	Rojo	5
M_30Az15Ro	Multicolor	Random.Triangular(17, 22, 25)
M_30Az15Ro	Azul	Random.Triangular(61, 80, 81)
M_30Az15Ro	Amarillo	5
M_30Az15Ro	Rojo	Random.Triangular(31, 36, 40)
Amarillo_15gr	Amarillo	Random.Triangular(28, 32, 45)
Amarillo_15gr	Rojo	5
Amarillo_30gr	Amarillo	Random.Triangular(35, 48, 60)
Amarillo_30gr	Rojo	5
Amarillo_45gr	Amarillo	Random.Triangular(41, 58, 68)
Amarillo_45gr	Rojo	5
Azul_15gr	Azul	Random.Triangular(39, 43, 64)
Azul_15gr	Amarillo	5
Azul_15gr	Rojo	5
Azul_30gr	Azul	Random.Triangular(61, 80, 81)
Azul_30gr	Amarillo	5
Azul_30gr	Rojo	5
Azul_45gr	Azul	Random.Triangular(90, 99, 113)
Azul_45gr	Amarillo	5
Azul_45gr	Rojo	5
Rojo_15gr	Rojo	Random.Triangular(31, 36, 40)
Rojo_30gr	Rojo	Random.Triangular(37, 45, 55)
Rojo_45gr	Rojo	Random.Triangular(47, 49, 58)

Fuente: Autoras (2017)

Como se puede evidenciar en la figura 29, la tabla 17 en formato Excel fue importada a Simio con el objetivo de relacionarla a las configuraciones de cada uno de los Server. De esta manera el Server cuenta la posibilidad de identificar la entidad entrante y procesarla dependiendo de la distribución asignada en la tabla.

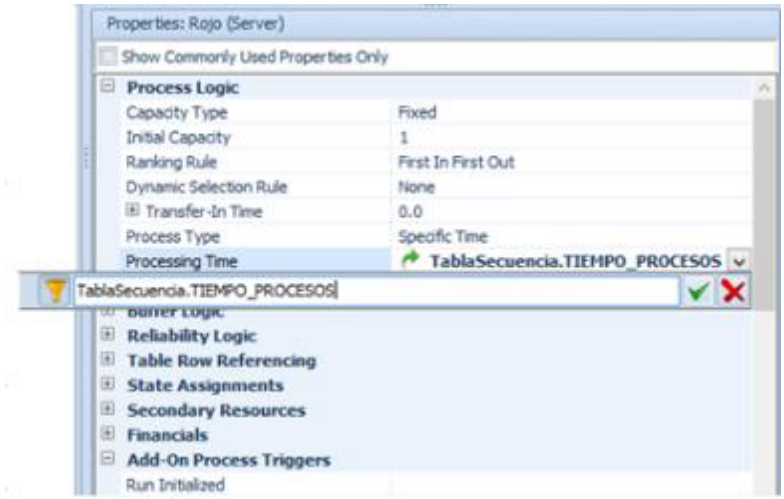
Figura 29. Tabla de secuencias importada a Simio



Fuente: Autoras (2017)

Las configuraciones relacionadas a los Server se pueden evidenciar en la figura 30. Allí en el apartado del Processing Time se relacionó, a través de una expresión compuesta de dos partes, la tabla importada en Excel. La primera parte corresponde al nombre de la tabla la cual fue etiquetada como Tabla Secuencia, seguido de un punto, se encuentra el nombre de la columna de la cual debe hacer lectura para ejecutar los procesos, para el caso de la tabla la columna fue nombrada como Tiempo_Procesos.

Figura 30. Configuraciones de los Server de llenado

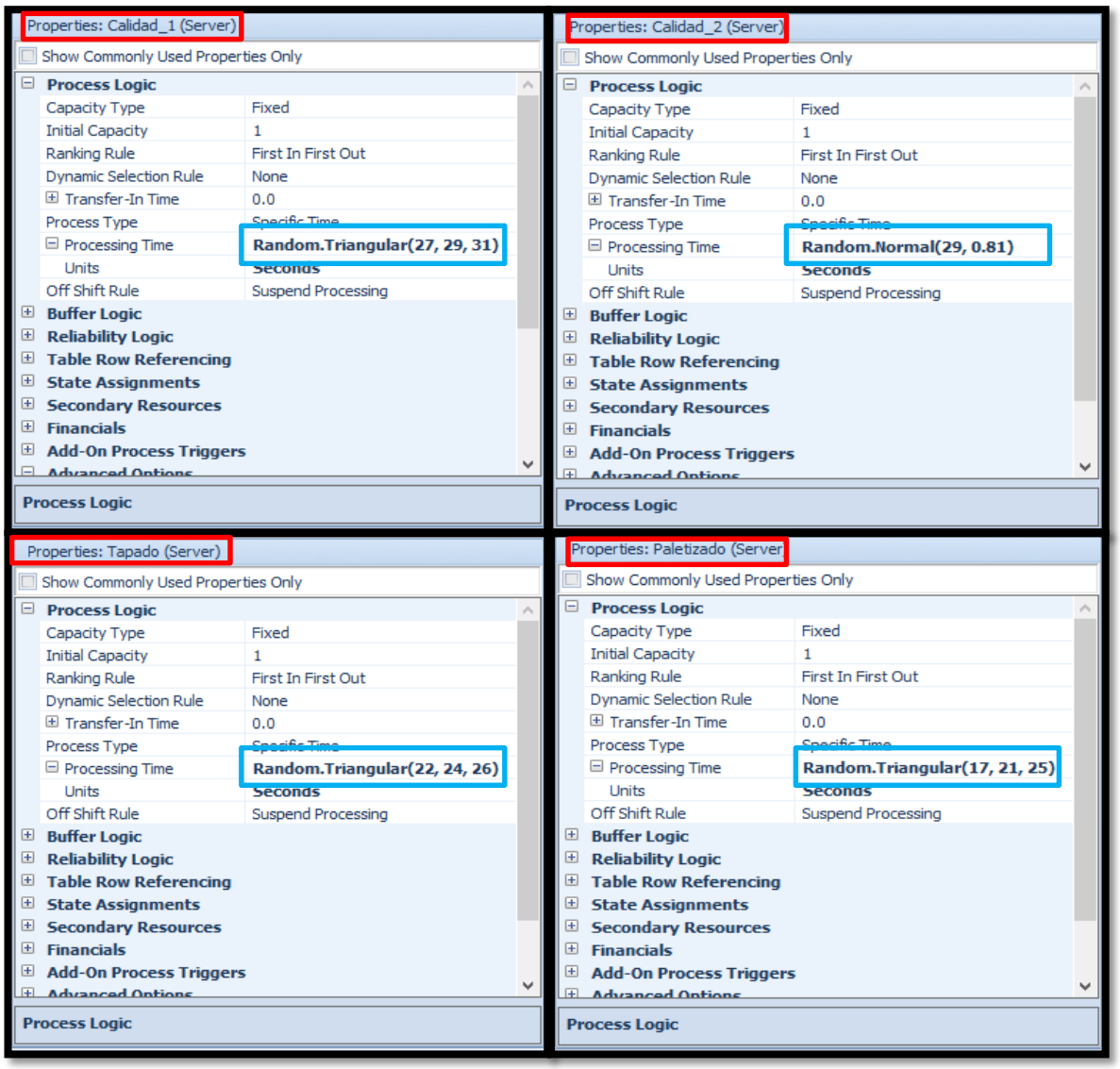


Fuente: Autoras (2017)

De acuerdo a lo explicado anteriormente, este proceso de enlazar la tabla importada a las configuraciones del Server, se realizó solo para las estaciones de Multicolor, Azul, Amarillo y Rojo.

Una vez las entidades salen de la estación de llenado Rojo, continúan el proceso de producción pasando por las estaciones de Calidad, Tapado, Inventario y Paletizado. Dado que los tiempos de proceso de estas estaciones no fueron incluidos dentro de la Tabla Secuencia por ser estándares para todos los tipos de producto, las configuraciones realizadas en cuanto a los Processing Time se realizaron de forma separada. La figura 31 muestra la forma en que fueron configuradas las propiedades de las estaciones mencionadas, en las cuales fueron introducidas de forma manual las distribuciones de probabilidad para cada estación.

Figura 31. Paneles de propiedades para las estaciones posteriores a las de llenado

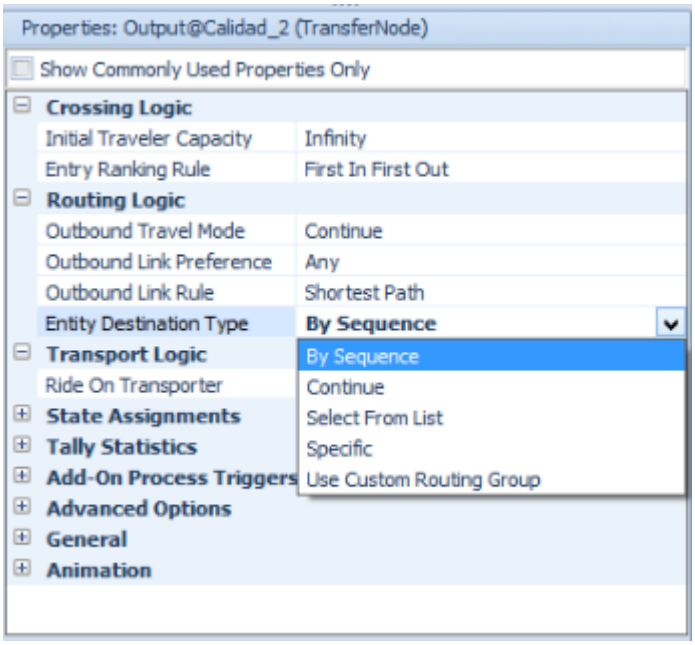


Fuente: Autoras (2017)

Como se ha mencionado a lo largo del documento, la estación de inventario no fue utilizada durante las corridas realizadas, por esta razón el Processing Time asignado a esta estación corresponde a un tiempo de espera de dos segundos, equivalente al tiempo que tarda el lector de códigos en identificar el bote.

Los Output de estos últimos Servers también tuvieron que ser configurados para lograr que las entidades continuaran con el proceso sin seguir una secuencia predeterminada por una tabla. De esta manera el Entity Destination Type de cada Output para las dos estaciones de Calidad, Tapado, Inventario y Paletizado fue modificado. La opción de configuración fue cambiada de tipo By Sequence a tipo Continue. (Ver figura 32)

Figura 32. Configuración Output estaciones de Calidad, Tapado, Inventario y Paletizado

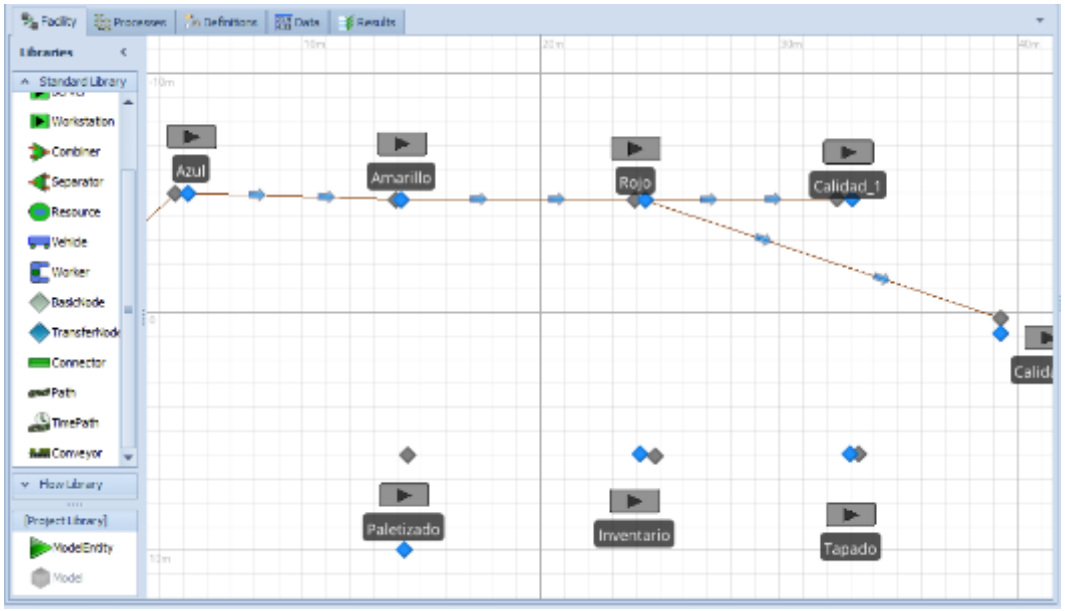


Fuente: Autoras (2017)

d) Links: A través de un link tipo TimePath el Output de cada estación fue unido al Input de la estación siguiente, a fin de establecer el camino por el cual debían seguir las entidades entrantes en el sistema.

Al momento de realizar las corridas en la celda, a través del ordenador se configuro el sistema para que los productos fueran revisados en una sola estación de calidad, de esta manera el sistema se configuró para que los botes lanzados en una orden de producción, ingresaran a las estaciones de Calidad en base a un porcentaje: 50% para Calidad 1 y 50% para Calidad 2. Debido a lo anterior se agregaron dos TimePath salientes del Output de la estación de llenado Rojo. Como se visualiza en la figura 33, uno de ellos fue enlazado al Input de la primera estación de calidad y el otro enlazado al Input de Calidad 2

Figura 33. TimePaths para ingreso a estaciones de Calidad

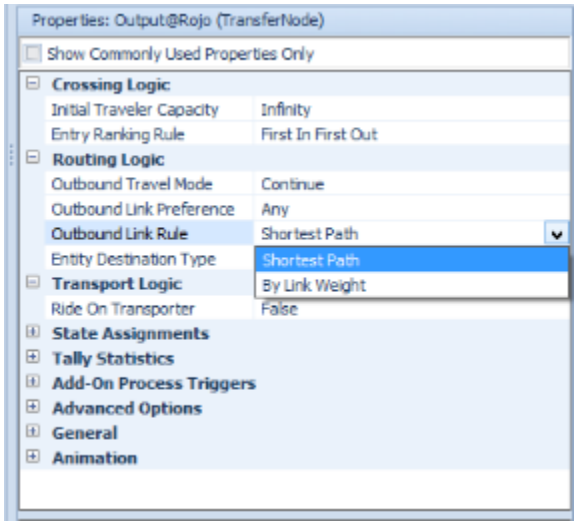


Fuente: Autoras (2017)

Posterior a realizar el enlace fue necesario realizar dos configuraciones, la primera de ellas en el Output del Server Rojo y la segunda sobre los dos TimePath salientes a las estaciones de calidad:

- La figura 34 muestra las propiedades del Output del server Rojo. La configuración realizada consistió en cambiar la regla del Outbound Link Rule de tipo Shortest Path a By Link Weight. Este cambio permite indicarle a Simio que las entidades al momento de abandonar el Server deben tomar por alguna de las rutas disponibles, y el proceso de selección lo hará en base un porcentaje de peso.

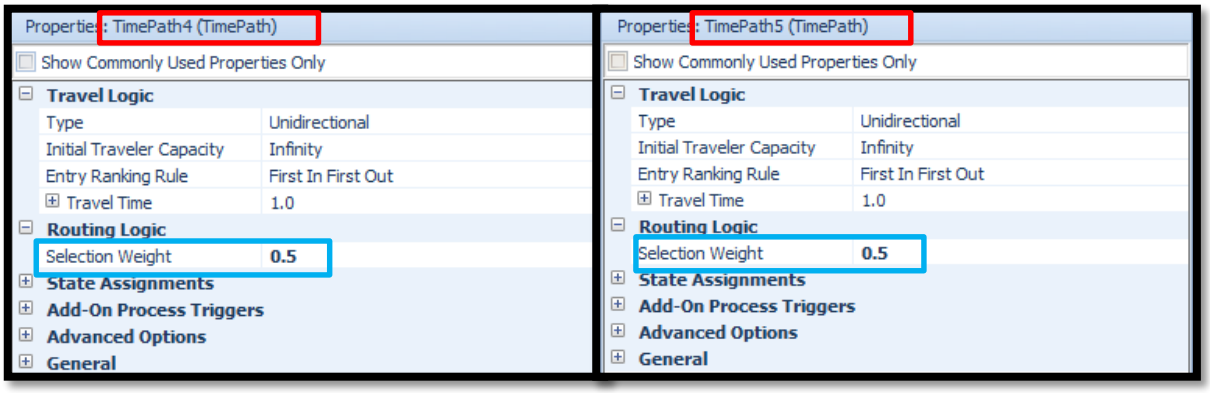
Figura 34. Configuración en las propiedades del Output Server Rojo



Fuente: Autoras (2017)

- Las configuraciones realizadas en los TimePath direccionados a las estaciones de calidad se encuentran relacionadas con la del Output del Server Rojo. Dado que las entidades ingresarán a una de las dos estaciones en base a un peso asignado, se registró en las propiedades de cada enlace un peso del 50%. La figura 35, muestra las propiedades de los dos TimePath. En el apartado Routing Logic un parámetro con la etiqueta Selection Weight brinda la posibilidad de ingresar los porcentajes deseados para cada enlace. De esta manera a cada enlace se le asignó un peso de 0.5.

Figura 35. Configuración de propiedades TimePaths estaciones de Calidad

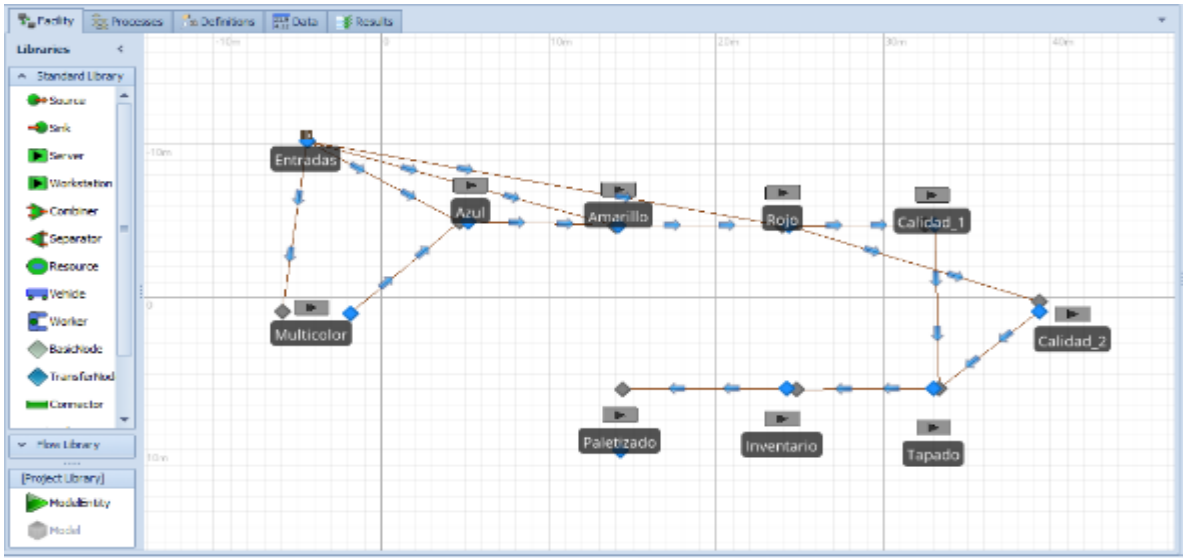


Fuente: Autoras (2017)

Una vez realizadas estas configuraciones y continuando con la unión de nodos, se enlazó el Output de Calidad 1 y Calidad 2 al Input de la estación de Tapado. El tapado enlazado al Inventario, e Inventario con Paletizado.

Las entradas también deben ser enlazadas a los objetos del modelo, estableciendo la ruta que deben seguir una vez son creadas e ingresan al sistema. Bajo esta condición, el Output de la entrada se enlazó a los Input de las estaciones de llenado a través de un Path. De esta manera la estructura del modelo que tal y como se aprecia en la figura 36.

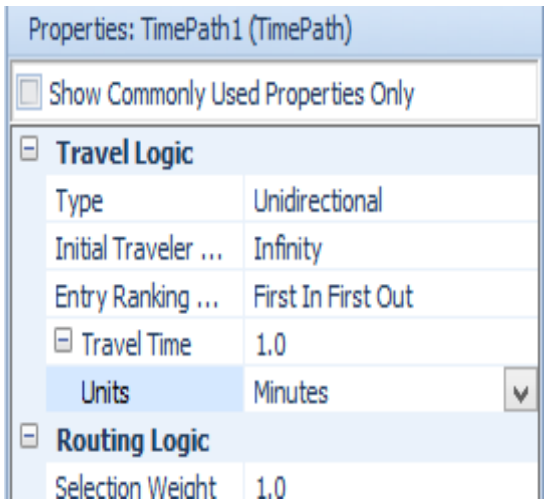
Figura 36. Modelo preliminar funcionamiento Celda Has-200



Fuente: Autoras (2017)

La principal característica de los enlaces tipo TimePath es permitir modificar el tiempo de transporte de las entidades entre un objeto y otro. Basados en los tiempos registrados en la tabla 10, presentada en la sección Caracterización de la celda, se realizaron las configuraciones en todos los TimePath del modelo. La figura 37, muestra el panel de propiedades de este tipo de enlace. En las opciones del Travel Logic se cuenta con una etiqueta llamada Travel Time en la cual es posible digitar el tiempo que deben tardar las entidades en recorrer el enlace, permitiendo modificar también las unidades del tiempo en semanas, días, horas, minutos o segundos. De esta manera los Travel Time de cada trayecto fueron modificados conforme a la tabla 10, especificando la unidad de tiempo en segundos.

Figura 37. Propiedades del TimePath



Fuente: Autoras (2017)

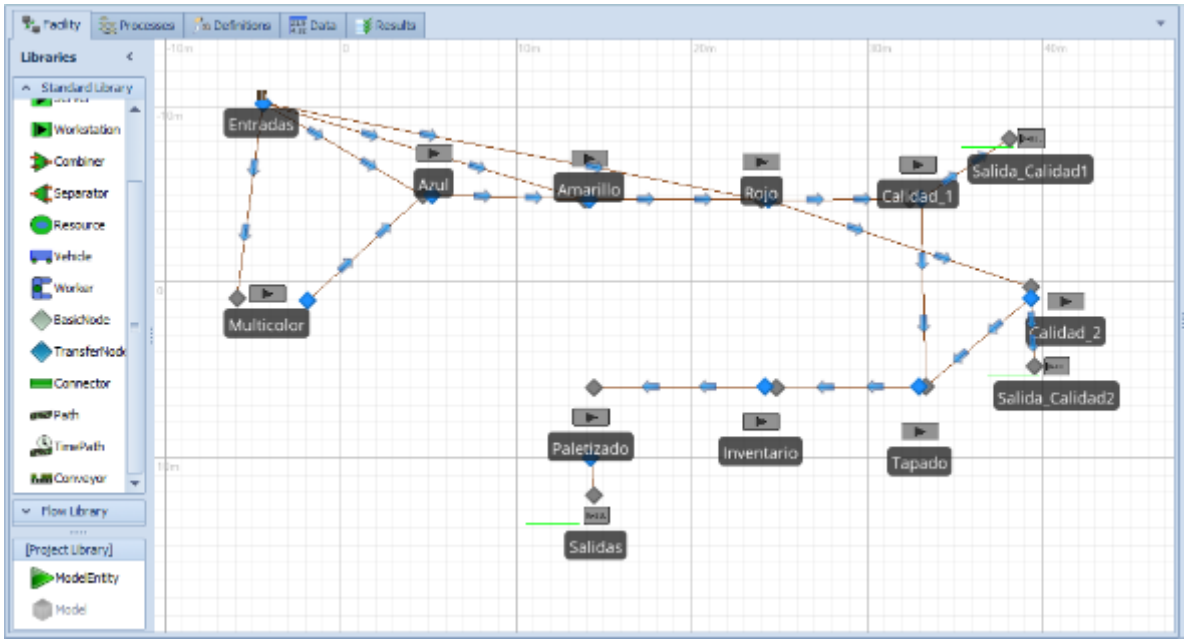
e) Salidas: Para finalizar, las últimas configuraciones realizadas al modelo se relacionaron con las salidas del sistema de las entidades. A través del objeto Sink de la biblioteca estándar de Simio, fueron creadas tres salidas. Dos ellas fueron ubicadas en los lados laterales de las estaciones de calidad y la tercera posterior a la estación de Paletizado.

Las salidas ubicadas en las estaciones de calidad cumplen la función de eliminar del sistema aquellas entidades que hayan sido rechazadas después de pasar por el control. Por otro lado la salida de la estación de Paletizado, elimina las entidades que completaron el proceso de producción. Los Output de los tres Servers fueron unidos mediante un Path a los Input de sus respectivas salidas.

Posterior a esto se realizaron modificaciones a los nodos de salida de las estaciones de calidad, esto con el fin de configurar el porcentaje de productos rechazados después de la inspección. De igual manera que con el Output del Server Rojo, la regla del Outbound Link Rule fue cambiando de tipo Shortest Path a By Link Way. Posterior a esto se asignaron porcentajes a los dos enlaces salientes de los nodos. El Path enlazado del Server Calidad 1 a la Salida se le asignó un peso de 0.9, el restante fue asignado al TimePath dirigido a la estación de Tapado. En cuanto al Server Calidad 2, el Path direccionado a la Salida se le asignó un peso de 0.9 y el restante al TimePath direccionado a Tapado.

De esta manera se da por terminado el montaje lógico de la simulación de la celda. La figura 38 permite visualizar la estructura grafica con la que conto el sistema.

Figura 38. Simulación funcionamiento celda Has-200



Fuente: Autoras (2017)

Una vez terminado el diseño, se realizaron corridas preliminares para validar que el sistema modelado en Simio se comportará de forma similar al real. Estas validaciones se realizaron en base a comparaciones de los tiempos de producción reales con respecto a los arrojados en los resultados de las simulaciones.

La figura 39 permite visualizar los resultados arrojados en Simio una vez finalizada la simulación. La tabla muestra todos los objetos creados en el modelo (Entradas, Salidas, Servers, Paths, TimePaths y Entidades) y de cada uno de ellos es posible visualizar: Cantidad de unidades creadas, procesadas y destruidas de cada tipo de entidad, tiempos promedios de producción, tiempo de operación mínimo y máximo.

Figura 39. Resultados corridas realizadas en Simio

Object Type	Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
ModelEntity	Rojo_45gr	[Population]	Content	NumberOnSystem	Average	0,3477
					Maximum	2,0000
					Minimum	0,0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hours)	0,0535
					Maximum (Hours)	0,0739
					Minimum (Hours)	0,0359
					Observations	13,0000
			Throughput	NumberCreated	Total	13,0000
				NumberDestroyed	Total	13,0000
	Rojo_30gr	[Population]	Content	NumberOnSystem	Average	0,4617
					Maximum	3,0000
					Minimum	0,0000
			FlowTime	TimeInSystem	Average (Hours)	0,0558
					Maximum (Hours)	0,0959
					Minimum (Hours)	0,0371
					Observations	16,0000
			Throughput	NumberCreated	Total	17,0000
				NumberDestroyed	Total	16,0000
	Rojo_15gr	[Population]	Content	NumberOnSystem	Average	0,3299
					Maximum	2,0000
					Minimum	0,0000

Fuente: Autoras (2017)

Agregando animaciones y cambiando las formas de los objetos se logró mejorar el aspecto visual del modelo diseñado. La figuras 40 y 41, muestra el diseño final con el que contó la simulación de la celda Has-200. De igual manera es posible visualizar el modelo con el Anexo 3- Modelo de la celda Has-200

Figura 40. Ambientación de la simulación celda Has-200 (Vista 2D)

Fuente: Autoras (2017)

Figura 41. Ambientación simulación celda Has-200 (Vista 3D)

Fuente: Autoras (2017)

2.3.3 Validación de la simulación: Una vez construido el modelo se procedió a realizar un proceso de validación, con el objetivo de comprobar que el sistema modelado en Simio contaba con un comportamiento similar al real. De esta manera, la validación del modelo se realizó a través de pruebas de hipótesis.

Se realzaron en total 19 pruebas de hipótesis diferentes, una por cada tipo de producto, en las cuales se realizaron comparaciones entre los tiempos de proceso del sistema real con respecto al simulado. De esta manera, como primer paso se procedió a plantear las dos afirmaciones con las cuales se basó el desarrollo de las pruebas (Ver fórmula 15):

Fórmula 15. Planteamiento de hipótesis para procesos de validación

$$H_0 = \text{tiempos promedios reales de proceso son iguales a los simulados}$$
$$H_1 = \text{tiempos promedios reales de proceso son diferentes a los simulados}$$

Fuente: Autoras (2017)

Como siguiente paso, se determinó para la prueba un grado de significancia del 5%, el cual nos representa el nivel de rechazo para la hipótesis nula (Ho). Al contar con un $\alpha = 0.05$, el correspondiente valor critico de Z es de 1,96.

Finalmente se establece el estadístico de prueba a utilizar, para ello se tuvo en cuenta ciertos aspectos con respecto a los datos obtenidos en la celda y los resultados de la simulación:

- Los dos tipos de datos, tanto reales como simulados, corresponden a muestras y no a datos poblacionales, por consiguiente de desconocer la desviación estándar poblacional.

- La cantidad de productos simulados y los reales son mayores a 30.
- Las distribuciones de probabilidad para cada uno de los procesos NO son de tipo normal.

De acuerdo con lo expuesto por Alea (1999) el estadístico de prueba a utilizar para datos con las anteriores características, está dado por la fórmula 16.

Fórmula 16. Estadístico de prueba

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{S^2_{n_1-1}}{n_1} + \frac{S^2_{n_2-1}}{n_2}}}$$

Fuente: Alea (1999)

Donde:

- $\bar{x}_1$ = media muestral datos reales
- $\bar{x}_2$ = media muestral datos simulados
- $S^2_{n_1-1}$ = varianza datos reales
- $S^2_{n_2-1}$ = varianza datos simulados
- n_1= número de datos de la muestra real
- n_2 = numero de datos de la muestra simulada

Una vez establecida la formula a utilizar, se procedió a realizar una corrida en la simulación a fin de obtener tiempos promedios de producción. Se ejecutó una simulación de 2.5 horas, en la cual fueron procesados un total de 248 productos. Simio permite visualizar los resultados de las corridas en forma de tabla, a través de esta fue posible determinar los tiempos de proceso de cada una de las entidades creadas (Ver Anexo 2- Análisis de tiempos y pruebas de hipótesis).

Contando con los tiempos de proceso real y los simulados se procedió a realizar los respectivos cálculos para desarrollar la fórmula 17. Tomando como ejemplo el producto Azul de 15 gr se obtuvieron los resultados que se evidencian en la tabla 18:

Tabla 18.Cálculos previos para el desarrollo del estadístico de prueba

AZUL 15 GR					
X1	X1-X1barra	(X1-X1barra)^2	X2	X2-X2barra	(X2-X2barra)^2
3,39	-0,045652174	0,002084121	4,14	0,44250	0,19580625
3,54	0,104347826	0,010888469	2,54	-1,15750	1,33980625
3,06	-0,375652174	0,141114556	4,52	0,82250	0,67650625
3,15	-0,285652174	0,081597164	4,47	0,77250	0,59675625
4,15	0,714347826	0,510292817	4	0,30250	0,09150625
4,37	0,934347826	0,87300586	3,01	-0,68750	0,47265625
4,11	0,674347826	0,454744991	3,48	-0,21750	0,04730625
3,44	0,004347826	1,89036E-05	4,38	0,68250	0,46580625
3,32	-0,115652174	0,013375425	3,05	-0,64750	0,41925625
3,22	-0,215652174	0,04650586	3,58	-0,11750	0,01380625
3,2	-0,235652174	0,055531947	4,5	0,80250	0,64400625
2,51	-0,925652174	0,856831947	3,39	-0,30750	0,09455625
2,51	-0,925652174	0,856831947	2,55	-1,14750	1,31675625
4	0,564347826	0,318488469	3,54	-0,15750	0,02480625

3,3	-0,135652174	0,018401512	3,2	-0,49750	0,24750625
3,32	-0,115652174	0,013375425	4,45	0,75250	0,56625625
3,32	-0,115652174	0,013375425	3,5	-0,19750	0,03900625
2,52	-0,915652174	0,838418904	4,32	0,62250	0,38750625
3,01	-0,425652174	0,181179773	2,5	-1,19750	1,43400625
3	-0,435652174	0,189792817	3,03	-0,66750	0,44555625
3,13	-0,305652174	0,093423251	4,16	0,46250	0,21390625
5,11	1,674347826	2,803440643	3,48	-0,21750	0,04730625
4,34	0,904347826	0,817844991	4,41	0,71250	0,50765625
TOTAL		9,190565217	3,9	0,20250	0,04100625
			4,01	0,31250	0,09765625
			4,03	0,33250	0,11055625
			3,43	-0,26750	0,07155625
			3,27	-0,42750	0,18275625
			3,33	-0,36750	0,13505625
			5,56	1,86250	3,46890625
			3,29	-0,40750	0,16605625
			3,3	-0,39750	0,15800625
			TOTAL		14,7196

Fuente: Autoras (2017)

La tabla 18 permite visualizar los resultados hallados a partir de los registros evidenciados en la anterior tabla.

Tabla 19. Parámetros hallados para el desarrollo de la fórmula 17

$\boldsymbol{n_1}$	23
$\boldsymbol{n_2}$	32
$\boldsymbol{\bar{x}_1}$	3,4357
$\boldsymbol{\bar{x}_2}$	3,6975
$\boldsymbol{S_1}$	$\frac{\sum(x_1-\bar{x}_1)^2}{n_1-1}=\frac{9{,}19}{23-1}=0{,}4177$
$\boldsymbol{S_2}$	$\frac{\sum(x_2-\bar{x}_2)^2}{n_2-1}=\frac{14{,}71}{32-1}=0{,}4748$

Fuente: Autoras (2017)

Una vez contamos con los datos necesarios se procedió a dar solución a la fórmula 16 para determinar el respectivo valor estadístico de Z. La fórmula 17 cuenta con los respectivos datos para el producto Azul de 15 gr.

Fórmula 17. Desarrollo formula 16 para producto Azul de 15 gr

$$Z=\frac{(3{,}4357-3{,}6975)}{\sqrt{\frac{0{,}4177}{23}+\frac{0{,}4748}{32}}}=1{,}44$$

Fuente: Autoras (2017)

Se puede observar que el valor de Z es menor a 1.96, por tanto aceptamos la hipótesis nula (Ho). Esto quiere decir que estadísticamente no existe una diferencia entre las medias simuladas y las reales.

Todos los anteriores cálculos fueron realizados para los 18 productos restantes, los cuales pueden ser visualizados en el Anexo 2. La tabla 20 muestra una relación de los resultados obtenidos para el cálculo estadístico de Z.

Tabla 20. Consolidado resultados pruebas de hipótesis

PRODUCTO	TIEMPOS REALES			TIEMPOS SIMILADOS			Z	ESTADO HIPOTESIS Ho
	TIEMPO PROMEDIO	CANT	VARIANZA	TIEMPO PROMEDIO	CANT	VARIANZA		
Azul_15gr	3,34	23	0,417753	3,70	32	0,4748258	1,44139255	ACEPTADA
Azul_30gr	4,03	8	0,9265071	4,07	10	0,4974767	-0,57386242	ACEPTADA
Azul_45gr	4,46	11	0,6831891	4,23	14	0,467394	-1,23830915	ACEPTADA
Amarillo_15gr	3,37	12	0,3649515	3,30	12	0,135875	-4,49926147	RECHAZADA
Amarillo_30gr	3,21	21	0,504109	3,08	30	0,9248603	-0,15963419	ACEPTADA
Amarillo_45gr	4,03	13	0,7030577	3,25	12	0,7475174	-1,72932232	ACEPTADA
Rojo_15gr	2,31	23	0,1541723	2,23	24	0,0407955	-1,25354401	ACEPTADA
Rojo_30gr	2,4	24	0,0044228	2,34	33	0,0015318	-6,25212448	RECHAZADA
Rojo_45gr	2,36	16	0,003625	2,42	18	0,03785	1,25181541	ACEPTADA
M_15Az15Am15Ro	4,4	8	0,0587929	4,45	13	0,1821436	-0,01447395	ACEPTADA
M_15Az15Am	4,3	3	0,0587929	3,98	2	0,1821436	-0,01447395	ACEPTADA
M_15Az15Ro	4,3	4	0,0244917	4,21	2	0,00405	0,80318339	ACEPTADA
M_15Az30Am	4,18	4	0,425625	3,82	2	13,738407	-0,29248756	ACEPTADA
M_15Az30Ro	4,49	5	0,04285	4,12	8	0,1674125	-1,05533979	ACEPTADA
M_30Az15Am	4,3	3	0,4850333	4,58	5	0,09482	-0,19136366	ACEPTADA
M_30aZ15Ro	3,53	3	0,1662333	5,13	2	1,9208	0,43986956	ACEPTADA
M_15Am15Ro	4,55	14	0,4273302	3,84	19	0,338293	-1,79473046	ACEPTADA
M_15Am30Ro	4,27	6	0,8371767	4,06	9	0,2502694	-0,11272218	ACEPTADA
M_30Am15Ro	4,24	9	0,1036861	3,48	3	0,0142333	-4,5129297	RECHAZADA

Fuente: Autoras (2017)

De los anteriores resultados se puede observar que en tres productos fue rechazada la hipótesis nula, lo que nos indica que los tiempos de proceso de estos productos no se ajustan a los tiempos reales. Bajo este nuevo escenario, fue necesario realizar modificaciones en la simulación a los tiempos de proceso de estos tres productos, lo anterior con el objetivo de que la hipótesis nula quedara aceptada.

La tabla 21, presenta un comparativo entre las anteriores distribuciones de probabilidad para las estaciones de llenado y como estas quedaron ajustadas para aceptar la hipótesis Ho.

Tabla 21. Ajuste distribuciones de probabilidad

PRODUCTO	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	DISTRIBUCION AJUSTADA
Amarillo 15 gr	Triangular (28, 35, 45)	Triangular (70, 71, 72)
Rojo 30gr	Triangular (37, 35, 55)	Triangular (50, 51, 52)
Multicolor 30Am 15Ro	Amarillo=Triangular (35, 48, 60) Rojo= (31,36, 40)	Amarillo=Triangular (55, 56, 57) Rojo= (37,38, 39)

Fuente: Autoras (2017)

Realizando estos cambios en la tabla de secuencias de la simulación fue posible obtener los resultados que se muestran en la tabla 22, con respecto al estadístico de Z de los tres anteriores productos.

Tabla 22. Estadístico de Z para productos con prueba H1 aceptada

PRODUCTO	TIEMPOS REALES			TIEMPOS SIMILADOS			Z	ESTADO HIPOTESIS Ho
	TIEMPO PROMEDIO	CANT	VARIANZA	TIEMPO PROMEDIO	CANT	VARIANZA		
Amarillo_15 gr	3,4367	12	13,2963	3,5912	17	0,2688	0,1460	ACEPTADA
Rojo_30 gr	2,4338	24	0,2619	2,4243	23	0,2704	-0,6962	ACEPTADA
M_30Am15Ro	4,0589	9	18,63	4,12	12	18,87	0,03	ACEPTADA

Fuente: Autoras (2017)

Con estos ajustes realizados es posible concluir que el sistema modelado en Simio, cuenta con un comportamiento similar al del sistema real.

2.3.4 Adición módulos de reproceso al diseño actual de la celda: Una vez validado el modelo, el paso siguiente consistió en adaptar a este funcionamiento, las estructuras de reproceso expuestas en la sección 2.2 Identificación de mecanismos de reproceso. Como paso previo al diseño de todas las estructuras, se eliminaron las salidas ubicadas en las estaciones de calidad, por consiguiente la cantidad de botes eliminados del proceso, ya no serán eliminados, serán reprocesados.

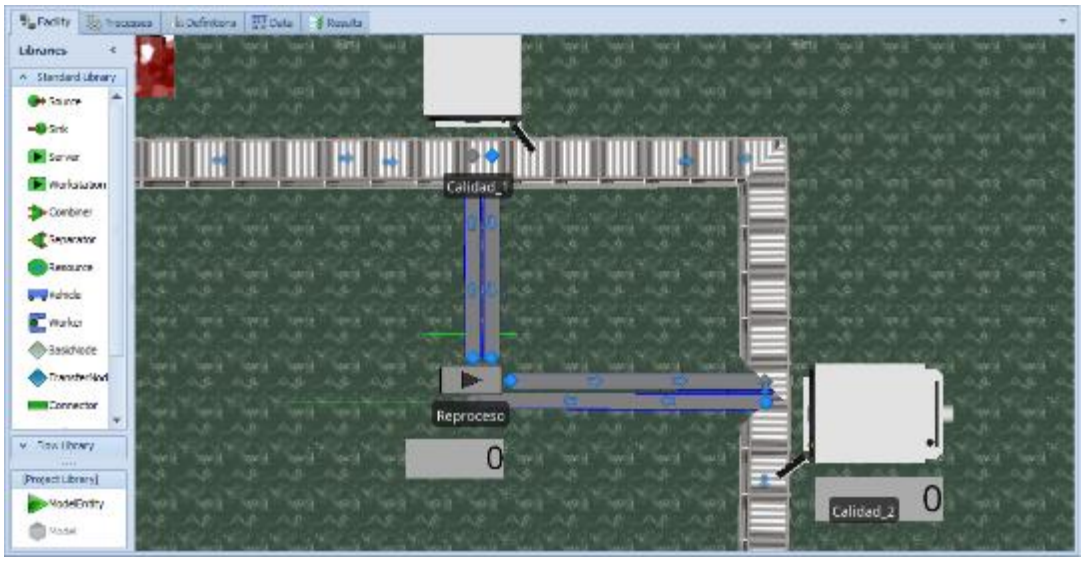
- Estructura de reproceso A: Esta estructura de reproceso establece que los productos defectuosos una vez son rechazados en las estaciones de calidad, deben pasar a una estación de reproceso la cual corrige las inconformidades del producto. Una vez terminan de ser reprocesadas deben pasar nuevamente a la estaciones de calidad, para ser revisadas por segunda vez.

  Como se mencionó anteriormente, las salidas ubicadas en las estaciones de calidad fueron eliminadas y los porcentajes de productos defectuosos rechazados en estas estaciones fueron asignados a los TimePath direccionados a la estación de Reproceso.

  La estructura se adaptó a la celda creando un nuevo Server, al cual se le asignó como Processing Time una distribución en segundos de tipo Triangular con un mínimo de 45, una moda de 50 y un máximo de 55. A través de un TimePath se enlazaron los dos Output de las estaciones de Calidad al Input de esta estación de Reproceso. Este enlace permite que los productos desechados de las dos estaciones de calidad, ingresen a la nueva estación para ser reparados.

  De igual manera, el Output de esta nueva estación se enlazó con los Input de las dos Calidades, logrando así que los productos salientes del reproceso sean inspeccionados nuevamente. De esta manera el diseño de la celda al incluir esta nueva función queda tal y como se muestra en la figura 42.

Figura 42. Diseño de la celda Has-200 con estructura de reproceso A



Fuente: Autoras (2017)

Posterior a esto se realizó una configuración a las propiedades del Output de la estación de Reproceso. La regla del Outbound Link Rule fue cambiada a By Link Weight, con el objetivo de que las entidades salientes de la estación, ingresen de nuevo a las estaciones de calidad en base a un peso dado para cada posible ruta.

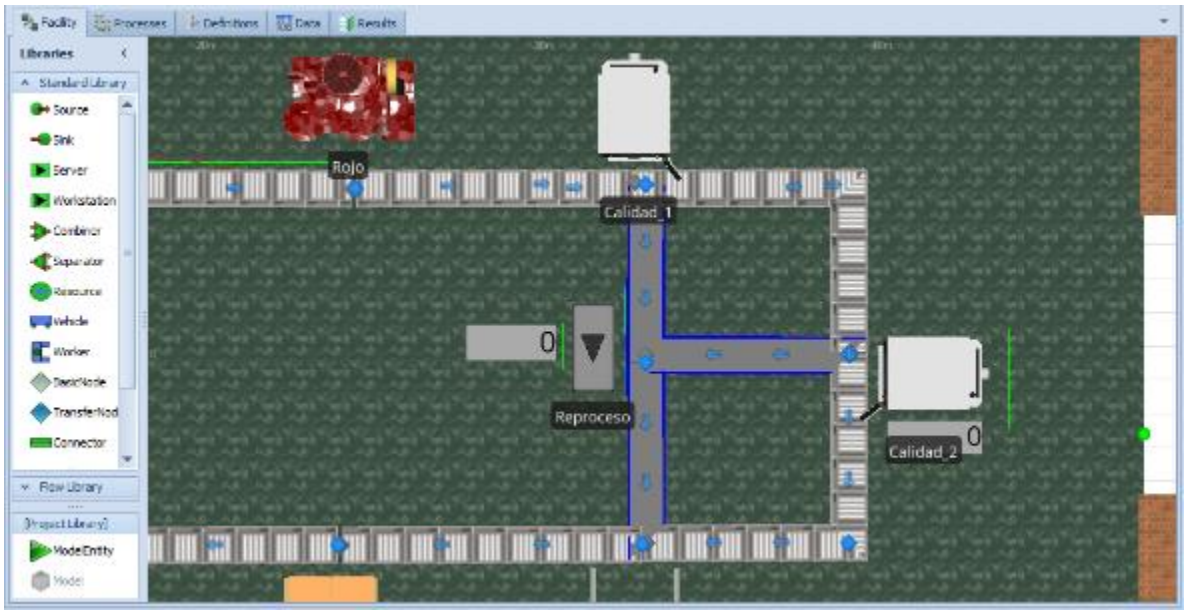
Finalmente fueron configuradas las propiedades de los TimePath enlazados del Output de reproceso a los Input de las estaciones de calidad, registrando en el Selection Weight un peso de 0.5 para cada ruta. El diseño del modelo implementado puede ser visualizado en el Anexo 4-Modelo Reproceso Estructura A.

- Estructura de reproceso B: Esta estructura propone que los productos desechados en las estaciones de calidad ingresen a una estación de reproceso para ser reparadas. A diferencia de la estructura A, los productos reprocesados no pasan de nuevo a una revisión, sino que continúan directamente con el proceso de producción.

  Para implementar esta estructura a la simulación, al igual que la anterior, fue necesario el uso de un nuevo Server para la estación de Reproceso. Se enlazaron mediante un TimePath los Output de las estaciones de calidad al Input de la nueva estación.

  Finalmente el Output de la estación de reproceso fue enlazado al Input de la estación de Tapado, logrando así que los productos reprocesados continúen directamente con el proceso de producción. La Figura 43, muestra el diseño de la Simulación con la estructura de reproceso B implementada. De igual manera es posible visualizar el modelo en el Anexo 5-Modelo Reproceso Estructura B.

Figura 43. Diseño de la celda Has-200 con estructura de reproceso B



Fuente: Autoras (2017)

- Estructura D: Para el diseño de esta estructura fue necesario además de la creación del Server de Reproceso, adicionar otra estación la cual corresponde a un tercer módulo de calidad. La figura 44, corresponde al diseño de la estructura D implementado al actual sistema con el que cuenta la celda Has-200. (Ver Anexo 6-Modelo reproceso estructura D)

Figura 44. Diseño de la celda Has-200 con estructura de reproceso D

Fuente: Autoras (2017)

De igual manera que las anteriores estructuras, se enlazaron los Output de las estaciones de Calidad al Input del módulo de Reproceso. El Output de esta última estación se enlazo al Input del nuevo módulo de Calidad, de esta manera los productos salientes del Reproceso son inspeccionados de nuevo en una estación adicional a las existentes.

Una vez los productos son revisados por este tercer módulo de calidad, los productos pueden tomar por dos caminos dependiendo de si fueron reparados en su totalidad o no. En caso de cumplir plenamente con las especificaciones, el producto continuará a la estación de Tapado para finalizar con el proceso; en caso contrario debe ingresar nuevamente a la estación de Reproceso para ser reparadas nuevamente.

Las propiedades de la estación del Reproceso en cuanto al Processing Time son iguales a las anteriores simulaciones. En cuanto al tercer módulo de calidad, se le asignó un Processing Time similar al de las dos estaciones existentes, una distribución Triangular (25, 27, 29) segundos. De igual manera la regla del Outbound Link Rule del Output de esta estación fue cambiada a tipo By Link Way.

La última modificación realizada consistió en la asignación de los pesos para cada una de las dos rutas. El TimePath direccionado nuevamente al Reproceso le fue registrado en el Selection Weight un peso de 0.01; por otro lado, el TimePath enlazado a la estación de Tapado se le asignó el equivalente restante, es decir 0.99.

- Estructura de reproceso E: La primera parte del diseño con el que cuenta esta estructura es similar a la estructura A, en cuanto al módulo de Reproceso. Adicional propone el uso de un Buffer para almacenar los productos, de esta manera para la implementación de esta estructura se hace uso de la estación de inventario con la que cuenta actualmente la celda. Para la implementación de la estructura se tomó como base el diseño realizado para la estructura A, realizando modificaciones en la estación de inventario.

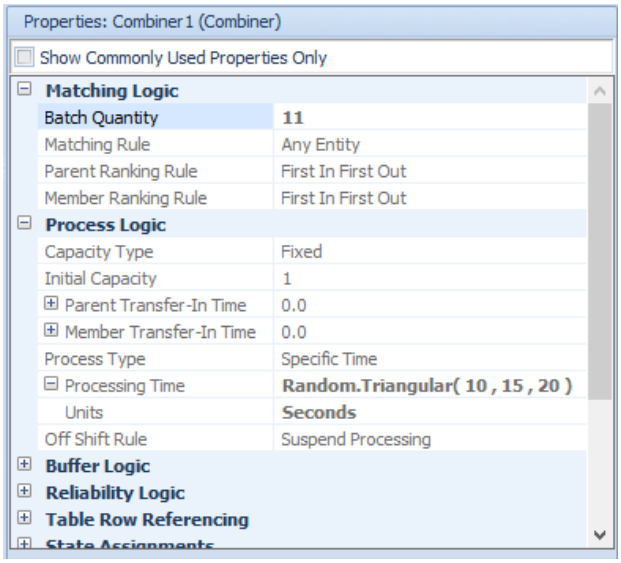
El objeto que representa la estación de Inventario fue cambiado de tipo Server a tipo Combiner. Esta modificación se realiza a fin de lograr que en la simulación queden almacenados los productos hasta que la orden se encuentre completa. Esto implica que los productos que pasaron la inspección por primera vez deben esperar hasta que los productos defectuosos sean reparados.

El crear este Combiner, nos llevó a la creación de una nueva entrada y una nueva entidad. Por un lado la entidad cumple la misión de ser la Entidad matriz del sistema, es decir será la encargada de transportar las entidades agrupadas en el Combiner; por otro lado la nueva entrada se encarga de crear estas entidades matrices. A esta nueva entrada le fue asignada una distribución de probabilidad de tipo Exponencial con una media de 5 minutos.

La figura 45 representa las propiedades del Combiner. En este panel se realizaron dos configuraciones: La primera de ellas relacionada a la cantidad de unidades que deben ser agrupadas antes de dirigirse a la siguiente estación, por tanto la opción Batch Quantity cuenta con una cantidad de 11 indicando que una vez se tengan en fila esta cantidad de productos, la entidad matriz podrá transportar los productos al siguiente punto; la segunda configuración fue

en el Processing Time, al cual se le asignó una distribución de tipo Triangular con un mínimo de 10, moda de 15 y un máximo de 20 segundos.

Figura 45. Panel de propiedades Combiner para estación de Inventario



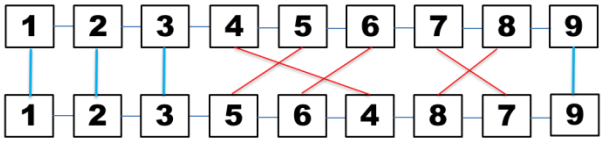
Fuente: Autoras (2017)

2.4 SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRUCTURA DE REPROCESO

Una vez diseñados los modelos de la celda con las estructuras de reproceso, se procedió a determinar cuál de estas se adapta mejor a su funcionamiento. Se analizaron tres factores base, para determinar esta selección: Tiempos de proceso, entropía y requerimientos técnicos. Cada uno de estos factores será explicado a continuación:

2.4.1 Entropía: Como fue definido en el marco teórico y conceptual, la entropía consiste en una medida que permite determinar el grado de desorden de un sistema. Se analizó la entropía generada en las corridas de producción, en relación al orden en que fueron procesados los diferentes productos. Se realizó una comparación entre las posiciones de salida de cada uno de los productos en la primera estación con respecto a las posiciones de llegada en la última etapa del proceso. La figura 46 permite visualizar de forma gráfica el procedimiento realizado para medir la entropía en cada uno de los modelos propuestos.

Figura 46. Medición de la entropía



Unidades fuera de posición	5
Máxima longitud de desorden	2
Mínima longitud de desorden	1

Fuente: Autoras (2017)

De esta manera analizando el ejemplo mostrado en la figura 46 se puede evidenciar que de los nueve productos procesados, solo 4 de ellos conservaron su posición original desde el inicio hasta el final del proceso. De los 5 productos que cambiaron de puesto, el producto número 4 presentó la longitud de desorden más larga, dado que su cambio de posición fue de dos unidades. El restante de los productos, cambiaron su posición en tan solo una unidad, por consiguiente la longitud mínima de desorden en esta corrida de producción es equivalente a 1.

El anterior análisis planteado, fue realizado para cada una de las diferentes estructuras simuladas a fin de identificar cuál de estas presentaba menos grado de desorden durante la ejecución de las corridas.

Bajo este escenario se configuraron los cinco modelos, para realizar una simulación de tres horas por cada uno de estos. Con los resultados de las tablas arrojadas por Simio, fue posible determinar el momento en que ingreso cada entidad a la primera estación y el momento en que salió del sistema, ya sea en las salidas de calidad o en la estación de paletizado. La figura 47, permite visualizar la forma en que fue analizado el grado de desorden en cada una de las corridas.

Figura 47. Análisis de la entropía para el actual sistema de la celda

Identificador de entradas

TIEMPO	PRODUCTO	ESTACION	IDENTIFICADOR LLEGADAS
0,006337302	Rojo_15gr.73	Input@Rojo	1
0,017194444	Amarillo_30gr.74	Input@Amarillo	2
0,033003968	Rojo_30gr.75	Input@Rojo	3
0,045781746	Rojo_15gr.76	Input@Rojo	4
0,056087302	M_15Am15Ro.77	Input@Multicolor	5
0,071365079	M_15Az15Ro.78	Input@Multicolor	6
0,085805556	Amarillo_30gr.79	Input@Amarillo	7
0,096212302	Azul_30gr.80	Input@Azul	8
0,109416667	Amarillo_15gr.81	Input@Amarillo	9
0,124948413	Rojo_15gr.82	Input@Rojo	10

Entradas

Identificador de salidas

TIEMPO	PRODUCTO	ESTACION	IDENTIFICADOR SALIDA	CRUCE IDENTIFICADOR	DIFERENCIA DE POSICION
0,04415412916	Rojo_15gr.73	Output@Paletizado	1	1	0
0,05835615367	Rojo_30gr.75	Input@SALIDA_CALIDAD	2	3	1
0,06184492877	Amarillo_30gr.74	Output@Paletizado	3	2	1
0,08540155521	Rojo_15gr.76	Output@Paletizado	4	4	0
0,11643725652	M_15Am15Ro.77	Output@Paletizado	5	5	0
0,13067820294	Amarillo_30gr.79	Output@Paletizado	6	7	1
0,13954912692	M_15Az15Ro.78	Output@Paletizado	7	6	1
0,15575785236	Azul_30gr.80	Input@SALIDA_CALIDAD	8	8	0
0,16275157489	Rojo_15gr.82	Output@Paletizado	9	10	1
0,16908807998	Amarillo_15gr.81	Output@Paletizado	10	9	1

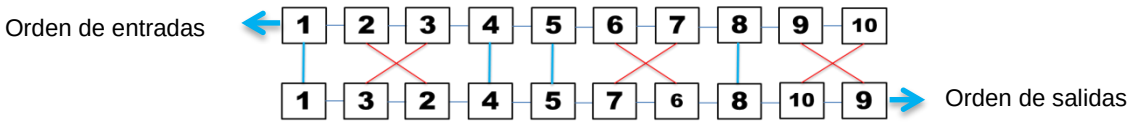
Salidas

Fuente: Autoras (2017)

La tabla de la parte izquierda representa las entidades entrantes al sistema, a cada una de ellas le fue asignado un identificador el cual representa el orden en que ingresaron a la primera estación, es decir las estaciones de llenado. Por otro lado la tabla de la parte derecha representa las entidades salientes del sistema, de igual manera a cada salida se le asignó un identificador, el cual representa el orden en que los productos llegaron a las estaciones de salida.

Una vez realizado esto, fueron agregadas dos columnas en la tabla de las salidas. En una de ellas se realizó un cruce de información con la tabla de las entradas, a fin de traer los identificadores asignados en esta primera tabla. Con esta operación es posible determinar cuáles productos cambiaron su posición durante la corrida simulada. La figura 48, representa de forma gráfica los cambios en la secuencia de a figura 47.

Figura 48. Desorden en la secuencia de la figura 47



Unidades fuera de posición	6
Máxima longitud de desorden	1
Mínima longitud de desorden	1

Fuente: Autoras (2017)

La segunda columna agregada a la tabla de las salidas, corresponde a una diferencia entre el cruce de los identificadores y el identificador de salida. Con este proceso se obtiene la cantidad de posiciones que cambio cada uno de los productos. De esta manera los productos que cuenten con un cero en esta columna, representan los productos que conservaron su secuencia desde el inicio hasta el final del proceso, para casos del ejemplo cuatro de los diez productos cuentan con esta condición. Por otro lado aquellos productos con números superiores o iguales a 1, representan aquellos productos que cambiaron su posición, y el número consignado en esta columna indica la cantidad de posiciones en que cambiaron a lo largo de la corrida.

Este proceso fue realizado con los otros resultados de las simulaciones (Ver Anexo 8-Analisis de la entropía). La tabla 23 permite visualizar un consolidado de los datos obtenidos de la simulación para el modelo actual de la celda de manufactura.

Tabla 23. Consolidado resultado análisis de la entropía-Modelo actual de la celda

	Modelo base de la celda						
ENTIDAD	UNIDADES PRODUCIDAS	UNIDADES EN POSICIÓN	UNIDADES FUERA DE POSICIÓN	CAMBIO UNA POSICIÓN	CAMBIO DOS POSICIONES	CAMBIO TRES POSICIONES	CAMBIO CUATRO POSICIONES O MÁS
Azul_15gr	27	17	10	7	3	0	0
Azul_30gr	13	5	8	7	1	0	0
Azul_45gr	17	5	12	9	2	1	0
Amarillo_15gr	17	5	12	10	1	1	0
Amarillo_30gr	34	16	18	16	2	0	0
Amarillo_45gr	14	6	8	7	1	0	0
Rojo_15gr	38	12	26	21	4	1	0
Rojo_30gr	28	9	19	13	6	0	0
Rojo_45gr	22	9	13	10	2	1	0
M_15Az15Am15Ro	8	0	8	5	3	0	0
M_15Az15Am	2	1	1	1	0	0	0
M_15Az15Ro	4	2	2	1	1	0	0
M_15Az30Am	4	0	4	4	0	0	0
M_15Az30Ro	9	3	6	5	0	1	0
M_30Az15Am	6	2	4	4	0	0	0
M_30Az15Ro	2	1	1	1	0	0	0
M_15Am15Ro	17	11	6	6	0	0	0
M_15Am30Ro	12	6	6	5	1	0	0
M_30Am15Ro	13	6	7	7	0	0	0
TOTAL	**287**	**116**	**171**	**139**	**27**	**5**	**0**

Fuente: Autoras (2017)

Una vez establecido esto, se puede deducir que tan solo el 40,41% de los productos procesados en la simulación lograron mantener su posición original desde el principio hasta el final de la corrida. De los 171 productos que cambiaron su posición, 139 entidades cambiaron en tan solo una posición, 27 cambiaron su puesto original en dos posiciones y 5 de ellos llegaron a tener un cambio de hasta tres posiciones.

Una vez determinado el grado de entropía generado en el sistema con el que cuenta la celda, se procedió a analizar los otros cuatro modelos con las estructuras de reproceso. La tabla 24 permite visualizar la relación de las entidades creadas con la simulación que posee la estructura de reproceso A.

Tabla 24. Consolidado resultado análisis de la entropía-Estructura de reproceso A

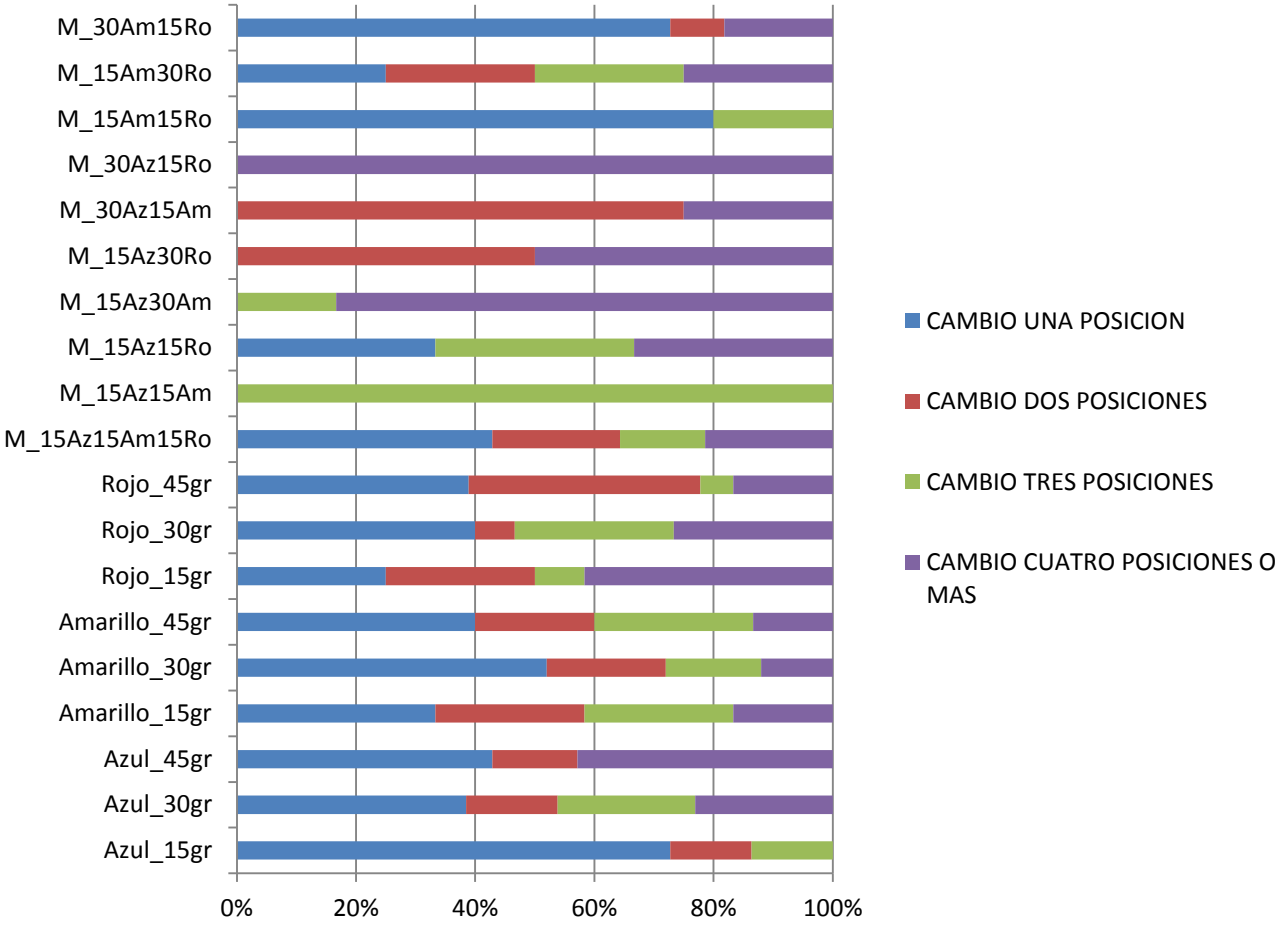
	Estructura de Reproceso A							
ENTIDAD	UND	CANT REPROCESOS	UND EN POSICIÓN	UND FUERA DE POSICIÓN	CAMBIO UNA POSICIÓN	CAMBIO DOS POSICIONES	CAMBIO TRES POSICIONES	CAMBIO CUATRO POSICIONES O MAS
Azul_15gr	31	4	9	22	16	3	3	0
Azul_30gr	16	3	3	13	5	2	3	3
Azul_45gr	18	1	4	14	6	2	0	6
Amarillo_15gr	16	4	4	12	4	3	3	2
Amarillo_30gr	35	2	10	25	13	5	4	3
Amarillo_45gr	21	4	6	15	6	3	4	2
Rojo_15gr	27	5	3	24	6	6	2	10
Rojo_30gr	18		3	15	6	1	4	4
Rojo_45gr	20	1	2	18	7	7	1	3
M_15Az15Am15Ro	20	2	6	14	6	3	2	3
M_15Az15Am	2		1	1	0	0	1	0
M_15Az15Ro	8		2	6	2	0	2	2
M_15Az30Am	7		1	6	0	0	1	5
M_15Az30Ro	5	1	1	4	0	2	0	2
M_30Az15Am	4	2	0	4	0	3	0	1
M_30Az15Ro	5		3	2	0	0	0	2
M_15Am15Ro	15	1	10	5	4	0	1	0
M_15Am30Ro	6		2	4	1	1	1	1
M_30Am15Ro	16	1	5	11	8	1	0	2
TOTAL	290	31	75	215	90	42	32	51

Fuente: Autoras (2017)

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 24, con esta estructura de reproceso el nivel de entropía equivale al 74,13%. Este cambio se debe a que, mientras unas entidades están siendo reprocesadas otras entidades pasan la inspección y continúan con el proceso de producción, esto se puede corroborar por la cantidad de productos que fueron reprocesados.

El grafico 8 muestra la relación de cada una de las entidades creadas con su respectiva cantidad de productos que se encontraron fuera de posición.

Gráfico 8. Relación productos fuera de posición -Estructura de reproceso A



Fuente: Autoras (2017)

Como se puede evidenciar en el gráfico 8 los cambios en una sola posición fueron los más presentados, del total de productos que cambiaron su posición el 41,8% de las entidades tan solo cambio en un puesto su posición final con respecto a la inicial. También se puede evidenciar que el 23,72% de los productos cambiaron de posición en más de 4 puestos.

Como se puede evidenciar en el Anexo 8-Analisis de la entropía, existen entidades que llegaron a cambiar hasta 12 posiciones con respecto a su posición inicial. Muchos de estos casos donde la diferencia de posiciones fue muy grande, se debió a que las entidades después de ser reparadas debían pasar nuevamente por la inspección, por consiguiente estas entidades si fueron rechazadas nuevamente en las estaciones de calidad, tuvieron que pasar al reproceso por segunda vez.

Con la información presentada hasta el momento, es posible deducir que implementando esta estructura de reproceso A en la celda de manufactura, el grado de entropía aumenta en comparación con el actual modelo que no cuenta con una estación de reproceso.

Continuando con el análisis, la tabla 25 presenta los resultados analizados de la corrida realizada en la simulación la cual cuenta con la estructura de reproceso B.

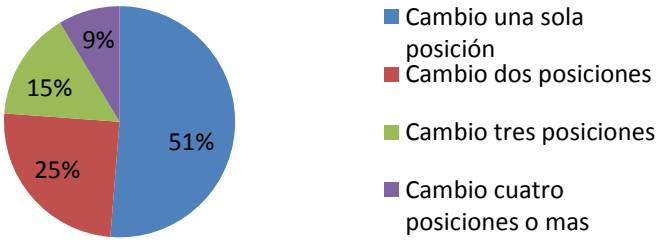
Tabla 25. Consolidado resultado análisis de la entropía-Estructura de reproceso B

	Estructura de Reproceso B							
ENTIDAD	UND	CANT REPROCESOS	UND EN POSICIÓN	UND FUERA DE POSICIÓN	CAMBIO UNA POSICION	CAMBIO DOS POSICIONES	CAMBIO TRES POSICIONES	CAMBIO CUATRO POSICIONES O MAS
Azul_15gr	22	4	11	11	6	2	1	2
Azul_30gr	15	2	4	11	6	3	2	0
Azul_45gr	21	5	9	12	7	1	3	1
Amarillo_15gr	15	1	6	9	6	2	1	0
Amarillo_30gr	36	4	19	17	13	2	1	1
Amarillo_45gr	20	4	7	13	8	2	2	1
Rojo_15gr	27	5	3	24	9	10	3	2
Rojo_30gr	21		3	18	5	7	2	4
Rojo_45gr	15	1	0	15	6	5	4	0
M_15Az15Am15Ro	14	2	1	13	7	3	1	2
M_15Az15Am	3		1	2	1	0	1	0
M_15Az15Ro	18	3	5	13	7	3	2	1
M_15Az30Am	8	1	3	5	1	2	2	0
M_15Az30Ro	11	2	3	8	4	2	2	0
M_30Az15Am	5		2	3	0	1	0	2
M_30Az15Ro	2		0	2	2	0	0	0
M_15Am15Ro	18	3	5	13	7	3	2	1
M_15Am30Ro	7		4	3	3	0	0	0
M_30Am15Ro	10		5	5	3	1	1	0
TOTAL	**288**	**37**	**91**	**197**	**101**	**49**	**30**	**17**

Fuente: Autoras (2017)

De acuerdo con los resultados evidenciados en la tabla 26, con la implementación de esta estructura de retrabajo, el grado de desorden generado para las entidades equivale al 68,40%. Este valor es menor al de la estructura A, dado que los productos en esta primera forma de reproceso deben ser inspeccionados nuevamente después de ser reparados.

Gráfico 9. Cambios de posición - Estructura de reproceso B



Fuente: Autoras (2017)

El grafico número 9 permite visualizar que el 51% de los cambios de posición que sufrieron las entidades fue de tan solo un puesto con respecto a la posición tomada inicialmente. Se puede observar también que el porcentaje de productos que cambiaron su posición en cuatro puestos o más, bajo significativamente con respecto a la estructura de reproceso A, de igual manera el máximo registro de cambio de posición por una entidad es de 8 supuestos y no de 12 como la anterior estructura.

La tabla 26, muestra la consolidación de los resultados obtenidos para el modelo de la celda con la implementación de la estructura de reproceso D.

Tabla 26. Consolidado resultado análisis de la entropía-Estructura de reproceso D

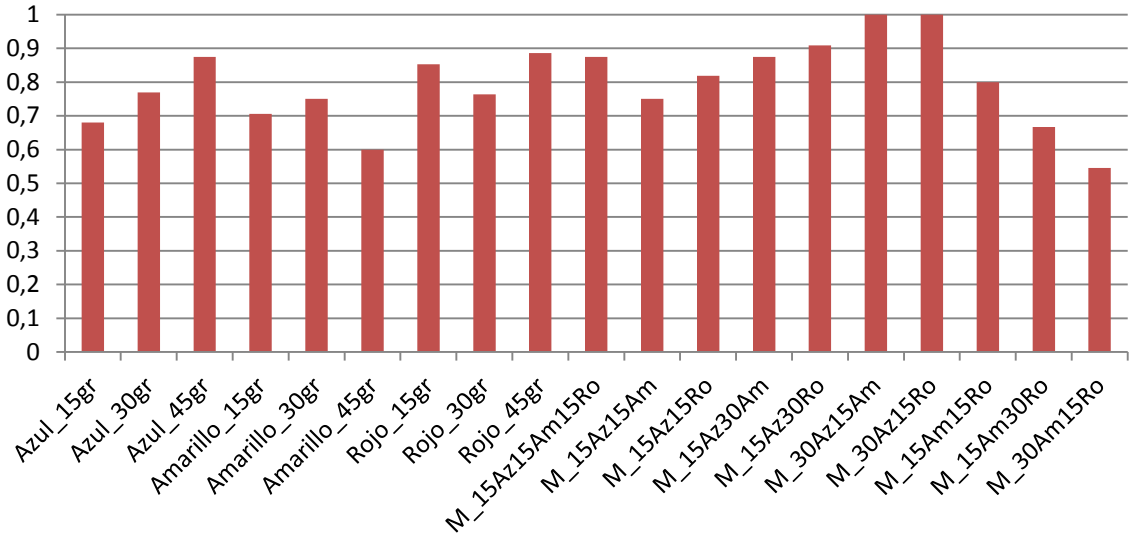
	Estructura de Reproceso D							
ENTIDAD	UND	CANT REPROCESOS	UND EN POSICIÓN	UND FUERA DE POSICION	CAMBIO UNA POSICION	CAMBIO DOS POSICIONES	CAMBIO TRES POSICIONES	CAMBIO CUATRO POSICIONES O MAS
Azul_15gr	25	3	8	17	8	3	2	4
Azul_30gr	13	3	3	10	4	3	1	2
Azul_45gr	16	2	2	14	4	0	4	6
Amarillo_15gr	17	1	5	12	6	1	1	4
Amarillo_30gr	36	3	9	27	14	7	4	2
Amarillo_45gr	20	1	8	12	4	4	3	1
Rojo_15gr	34	3	5	29	5	7	9	8
Rojo_30gr	38	6	9	29	9	9	5	6
Rojo_45gr	35	3	4	31	4	8	8	11
M_15Az15Am15Ro	16	2	2	14	4	2	3	5
M_15Az15Am	4		1	3	3	0	0	0
M_15Az15Ro	11		2	9	3	2	1	3
M_15Az30Am	8	1	1	7	1	2	3	1
M_15Az30Ro	11	1	1	10	2	5	1	2
M_30Az15Am	3	2	0	3	0	1	0	2
M_30Az15Ro	2	1	0	2	0	0	0	2
M_15Am15Ro	25		5	20	3	4	5	8
M_15Am30Ro	3	1	1	2	0	2	0	0
M_30Am15Ro	11		5	6	5	1	0	0
TOTAL	**328**	**33**	**71**	**257**	**79**	**61**	**50**	**67**

Fuente: Autoras (2017)

Al implementar esta estructura de reproceso el grado de entropía generado en el sistema equivale al 78,35%, de los 328 productos procesados en la simulación 257 sufrieron algún cambio de posición durante la ejecución de la corrida.

Se puede observar que nuevamente se aumentaron de forma considerable los cambios de posición en cuatro puestos o más, esto se debe a que los productos que son reprocesados deben pasar por una tercera estación de calidad antes de reincorporarse nuevamente al proceso de producción, esto genera que muchas otras entidades lleguen primero a la estación de paletizado antes de que el producto reprocesado logre continuar con la línea de producción.

Gráfico 10. Cambios de posición por entidad-Estructura de reproceso D

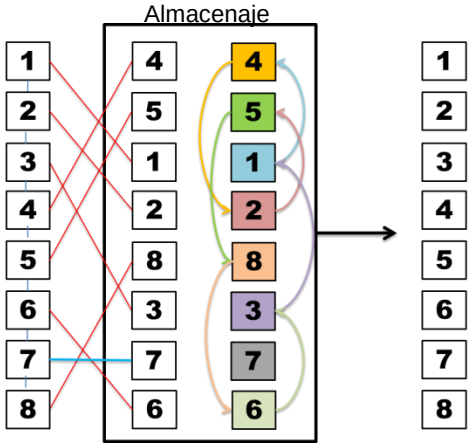


Fuente: Autoras (2017)

El gráfico 10 muestra la proporción de productos que cambiaron su posición con respecto al número de unidades creadas por cada tipo de entidad, de esta manera se puede deducir que más del 50% de las unidades creadas por tipo de producto sufrieron cambios en su posición a lo largo de la simulación.

Finalmente la tabla 27, permite visualizar los datos obtenidos de la simulación con la estructura E implementada. Se hace la aclaración que estos datos fueron analizados hasta el momento en el cual los productos ingresan a la estación de inventario. En este inventario las unidades deben esperar a que todos los productos enviados en la corrida se encuentren listos para ser despachados. Esto quiere decir que aquellos productos que pasaron la inspección por primera vez deben esperar en el inventario, hasta que aquellos productos que fueron reprocesados pasen las inspecciones y completen los siguientes procesos. La figura 49, permite visualizar el proceso poniendo en funcionamiento esta estación de almacenaje.

Figura 49. Funcionamiento gráfico del almacenaje (Buffer)



Fuente: Autoras (2017)

La figura 49 permite visualizar un ejemplo en el cual se identifica una corrida de producción compuesta por 8 productos. Estos productos al momento de ingresar a la estación de almacenaje, contaran con un desorden en su secuencia, producto de los anteriores procesos por los que paso cada uno. Este problema de desorden puede ser resulto en esta estación, ya que los productos, una vez la orden se encuentre completa, pueden ser reorganizados y colocados en su posición original. De esta manera al salir de la estación de almacenaje, los productos de la orden serán despachados con el orden original en que fueron enviados, de esta manera técnicamente el grado de entropía generado en el sistema será de 0.

El análisis de la entropía hasta la estación de inventario para esta estructura de reproceso E, se asemeja al realizado para la estación de reproceso A, dado que su funcionamiento es muy similar.

Tabla 27. Consolidado resultado análisis de la entropía-Estructura de reproceso E

	Estructura de Reproceso E							
ENTIDAD	UND	CANT REPROCESOS	UND EN POSICIÓN	UND FUERA DE POSICION	CAMBIO UNA POSICION	CAMBIO DOS POSICIONES	CAMBIO TRES POSICIONES	CAMBIO CUATRO POSICIONES O MAS
Azul_15gr	35	5	7	28	11	9	3	5
Azul_30gr	16	2	6	10	3	2	2	3
Azul_45gr	24		3	21	9	5	5	2
Amarillo_15gr	19	1	7	12	7	3	2	0
Amarillo_30gr	42	4	11	31	13	10	5	3
Amarillo_45gr	17	1	6	11	3	2	3	3
Rojo_15gr	24	3	6	18	3	3	5	7
Rojo_30gr	34	1	3	31	9	9	3	10
Rojo_45gr	29	1	4	25	14	4	1	6
M_15Az15Am15Ro	10	1	0	10	4	2	2	2
M_15Az15Am	1		1	0	0	0	0	0
M_15Az15Ro	10		3	7	2	4	1	0
M_15Az30Am	4	1	0	4	1	2	0	1
M_15Az30Ro	7	2	1	6	2	1	0	3
M_30Az15Am	3		1	2	0	0	0	2
M_30Az15Ro	3		1	2	1	0	0	1
M_15Am15Ro	16	2	5	11	5	3	1	2
M_15Am30Ro	9		4	5	3	1	1	0
M_30Am15Ro	9	1	2	7	6	1	0	0
TOTAL	**312**	**25**	**71**	**241**	**96**	**61**	**34**	**50**

Fuente: Autoras (2017)

La estación de Inventario al ser un objeto tipo Combiner, cuenta con la posibilidad de unir varias entidades en una sola antes de continuar a la estación de Paletizado. No fue posible obtener resultados que permitieran visualizar los tipos de entidades que eran emparejadas en esta estación, pero se logró el objetivo de hacer que las entidades tengan un tiempo de espera en el inventario hasta que la orden enviada se encuentre completa.

La tabla 28 permite visualizar un comparativo de las todas las estructuras de reproceso, incluyendo el actual modelo de la celda.

Tabla 28. Tabla resumen análisis de entropía

Variable	Modelo actual	Estructura A	Estructura B	Estructura D	Estructura E
Unidades creadas	**287**	**290**	**288**	**328**	**312**
Unidades reparadas	**29**	**31**	**37**	**33**	**25**
Unidades en posición	**116**	**75**	**91**	**71**	**312**
Unidades fuera de posición	**171**	**215**	**197**	**257**	**0**
Grado de entropía	**59,58%**	**74,13%**	**68,4%**	**78,35%**	**0%**

Fuente: Autoras (2017)

2.4.2 Tiempos de proceso: Con los resultados de las corridas realizadas para el análisis de la entropía, se logró hacer una comparación entre los tiempos de proceso de cada tipo de producto en las diferentes estructuras. El objetivo de esta comparación fue analizar el Makespan de cada una de las estructuras, a fin de determinar con cual estructura de retrabajo los productos en el sistema se tardaban más en ser procesados. La tabla 29, presenta un consolidado de los tiempos analizados.

Tabla 29. Análisis tiempos de proceso

	MODELO ACTUAL			**ESTRUCTURA A**			**ESTRCUTURA B**			**ESTRCUTURA D**			**ESTRUCTURA E**		
	1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
Amarillo_15gr	17	3,67	2	16	4,88	4	15	4,02	1	17	4,53	1	19	7,73	1
Amarillo_30gr	34	3,26	4	35	4,12	2	36	3,8	4	36	4,19	3	42	9,25	4
Amarillo_45gr	14	3,81	1	21	4,44	4	20	4,21	4	20	4,22	1	17	8,68	1
Azul_15gr	27	3,78	5	31	4,59	4	22	4,46	4	25	5,11	3	35	9,11	5
Azul_30gr	13	4,16	3	16	6,04	3	15	4,52	2	13	5,74	3	16	9,65	2
Azul_45gr	17	4,61	2	18	6,34	1	21	5,07	5	16	6,37	2	24	9,95	
M_15Am15Ro	17	4,03		15	4,76	1	18	5,13	3	25	6,25		16	9,35	2
M_15Am30Ro	12	4,65	2	6	5,9		7	4,91		3	5,59	1	9	8,19	
M_15Az15Am	2	4,06		2	6,02		3	4,66		4	4,4		1	9,94	
M_15Az15Am15Ro	8	4,97		20	5,8	2	14	5,51	2	16	6,41	2	10	8,63	1
M_15Az15Ro	4	4,22	1	8	6,4		18	4,75	3	11	5,67		10	8,4	
M_15Az30Am	4	4,82		7	7,6		8	5,46	1	8	6,02	1	4	10,8	1
M_15Az30Ro	9	4,8		5	7,43	1	11	5,28	2	11	5,81	1	7	10,34	2
M_30Am15Ro	13	4,36	1	16	4,65	1	10	4,35		11	5,06		9	10,41	1
M_30Az15Am	6	4,43	1	4	6,57	2	5	6,42		3	6,69	2	3	13,2	
M_30Az15Ro	2	4,47		5	5,99		2	5,66		2	9,51	1	3	13,02	
Rojo_15gr	38	2,75	2	27	3,4	31	27	2,99	5	34	3,26	3	24	6,87	3
Rojo_30gr	28	2,92	3	18	3,16		21	3,12		38	3,78	6	34	6,92	1
Rojo_45gr	22	3,05	2	20	3,47	1	15	3,46	1	35	3,72	3	29	7,84	1
TIEMPOS PROMEDIOS REPROCESOS				49,37 seg			50,01 seg			53,57 seg			49,93 seg		
TIEMPOS PROMEDIOS ESTACIONES CALIDAD 3 –INVENTARIO										28,81 seg					

Fuente: Autoras (2017)

En la tabla se puede observar que cada estructura de reproceso cuenta con tres numeraciones las cuales corresponden a: Primero, cantidad de unidades procesadas durante la simulación; dos, tiempos promedios de proceso por entidad; tres cantidad de productos reprocesados.

Se puede observar que al implementar cualquier estructura de reproceso, los tiempos promedio de cada entidad en el sistema aumentan considerablemente. A simple vista, la estructura de reproceso que más aumenta los tiempos de producción es la E, esto se debe a que las entidades se ven obligadas a esperar en el inventario hasta que la orden de producción enviada se encuentre completa.

A continuación la tabla 30, muestra variaciones porcentuales en cuanto al aumento de los tiempos de producción de cada entidad para cada estructura, con respecto al actual funcionamiento de la celda.

Tabla 30. Variaciones porcentuales en tiempos de proceso

ENTIDAD	ESTRCUTURA A	ESTRCUTURA B	ESTRCUTURA D	ESTRCUTURA E
Amarillo_15gr	32,97	9,54	23,43	110,63
Amarillo_30gr	26,38	16,56	28,53	183,74
Amarillo_45gr	16,54	10,50	10,76	127,82
Azul_15gr	21,43	17,99	35,19	141,01
Azul_30gr	45,19	8,65	37,98	131,97
Azul_45gr	37,53	9,98	38,18	115,84
M_15Am15Ro	18,11	27,30	55,09	132,01
M_15Am30Ro	26,88	5,59	20,22	76,13
M_15Az15Am	48,28	14,78	8,37	144,83
M_15Az15Am15Ro	16,70	10,87	28,97	73,64
M_15Az15Ro	51,66	12,56	34,36	99,05
M_15Az30Am	57,68	13,28	24,90	124,07
M_15Az30Ro	54,79	10,00	21,04	115,42
M_30Am15Ro	6,65	-0,23	16,06	138,76
M_30Az15Am	48,31	44,92	51,02	197,97
M_30Az15Ro	34,00	26,62	112,75	191,28
Rojo_15gr	23,64	8,73	18,55	149,82
Rojo_30gr	8,22	6,85	29,45	136,99
Rojo_45gr	13,77	13,44	21,97	157,05

Fuente: Autoras (2017)

Con esta tabla se corrobora que la estructura E es la que más aumenta los tiempos de proceso, como se puede observar cada tiempo de proceso lo está aumentando en más de un 100%. La estructuras A y D aumentan los tiempos de producción de forma similar, en promedio la estructura A esta incrementado los tiempos en un 30.99% mientras que la estructura D en un 32,46%.

Finalmente la estructura de reproceso B, es la que la que presenta menos variabilidad en el cambio de tiempos de producción, en promedio esta estructura aumenta los tiempos de proceso con respecto al actual funcionamiento de la celda en un 14,10%.

2.4.3 Requerimientos técnicos: El último aspecto a analizar para la selección de la mejor estructura, está relacionado con la implementación física de esta estructura dentro del laboratorio.

A continuación a través de la tabla 31 se establece una relación de las estructuras de reproceso planteadas y los requerimientos necesarios para su implementación real en la celda.

Tabla 31. Relación de requerimientos técnicos para la implementación de las estructuras

Estructura de reproceso A	• Para la implementación de esta estructura se requiere la instalación de una nueva estación, la cual se debe encargar de solucionar los problemas de llenado presentados en los botes. • De acuerdo con lo planteado en la simulación, se hace necesario la instalación de cuatro bandas transportadoras. Dos de estas bandas estarán direccionadas desde las salidas de las estaciones de calidad a la entrada de esta nueva estación, las dos bandas restantes estarán ubicadas en sentido contrario, es decir estarán direccionadas desde la salida del reproceso a cada una de las estaciones de calidad. • Por último se requerirá la reprogramación de los PLC de las estaciones de calidad, para dar la orden de enviar los productos defectuosos a la nueva estación. De igual manera se hace necesario la inclusión de esta nueva estación en el software EdMes, para que la estación quede por completo adaptada a los procesos de la celda.
Estructura de reproceso B	• Al igual que la estructura A, se requiere la creación de una nueva estación para realizar las reparaciones de los productos defectuosos • A diferencia de la anterior estructura, esta solo requerirá el uso de tres tramos de banda transportadora. Dos de ellas dirigidas desde las salidas de las estaciones de calidad al nuevo módulo, y una tercera direccionada a la estación de tapado. • Además de ser necesaria la programación de los PLC de las estaciones de calidad, se debe configurar el que posee la estación de tapado. De igual manera se requerirá la inclusión de este nuevo módulo en todos los aplicativos del software EdMes
Estructura de reproceso D	• Esta estructura además de requerir la instalación del módulo de reproceso, necesita una estación de calidad adicional a los dos existentes. • Contando con dos módulos adicionales, se hace necesario el uso de 5 bandas transportadoras. Dos de ellas dirigidas de las estaciones de calidad al módulo de reproceso. Una de ellas direccionada de la estación de reproceso a la nueva estación de calidad. Otra instalada de esta nueva estación de calidad devuelta al módulo de reproceso. El último tramo direccionado de la estación de calidad 3 a la estación de tapado. • Al igual que las anteriores estructuras se requerirá la configuración de los PLC de las estaciones de calidad y tapado. También será necesario la inclusión de estas dos

	nuevas estaciones en los aplicativos del software EdMes.
Estructura de reproceso E	Esta estructura al contar con un sistema de reproceso idéntico al de la estructura A los requerimiento técnicos serán iguales, la diferencia radica en la programación adicional del PLC de la estación de inventario. Con esta configuración se pretende indicarle al módulo de inventario que una vez tenga todos los productos de la orden en su poder, los libere a la estación de paletizado de acuerdo al orden en que fueron lanzados los productos desde el ordenador.

Fuente: Autoras (2017)

Los factores que se deben tener en cuenta para la implementación de estas estructuras van mucho más allá de las expuestas en la anterior tabla, de esta forma lo planteado anteriormente hace referencia a rasgos generales a los elementos básicos y a simple vista identificables, de lo que se necesitaría para la instalación de estas estaciones.

Para finalizar se presenta la tabla 32, la cual establece una relación de los anteriores pilares expuestos con sus respectivos resultados para cada una de las estructuras de reproceso.

Tabla 32. Relación de entropía, tiempos de proceso y requerimiento para las estructuras de reproceso

VARIABLE	ESTRUCTURA A	ESTRUCTURA B	ESTRUCTURA D	ESTRUCTURA E
Entropía	74,13%	68.4%	78.35%	0%
Tiempos de proceso	30,99%	14,10%	32,40%	134,11%
Requerimientos	• Instalación de nueva estación • 4 tramos de bandas • Programación de PLC para dos estaciones	• Instalación de nueva estación • 3 tramos de bandas • Programación de PLC para tres estaciones	• Instalación de dos nuevas estaciones • 5 tramos de bandas • Programación de PLC para tres estaciones	• Instalación de nueva estación • 4 tramos de bandas • Programación de PLC para tres estaciones

Fuente: Autoras (2017)

De acuerdo con lo expuesto a lo largo de esta sección y a partir de lo mostrado en la tabla 32, se establece que la mejor estructura para implementar es la B. Primero en cuanto a la entropía del sistema, es la que menor desorden genera en la corridas de producción. Si bien es cierto la estructura E es la estructura con la cual se da solución al problema del desorden de la secuenciación, se debe tener en cuenta que no es la opción más acertada, dado que no es viable tener todos los productos represados hasta el momento en que toda la orden se encuentre lista para continuar con el proceso.

Como segundo punto, es la estructura que menos incrementa los tiempos de proceso. Con respecto al actual funcionamiento, los productos tardarían un 14,5% más del tiempo regular. Finalmente es la estructura que menos requerimientos físicos necesita, aparte de la instalación de un nuevo módulo, se hace necesaria la construcción de tres rutas correspondientes a dos entradas y una salida, a diferencia de las otras opciones donde se debe instalar más de tres rutas o instalar más de dos nuevas estaciones.

2.5 EJEMPLO APLICATIVO

Como se describió al principio del documento la celda Has-200 simula un ambiente automatizado de la industria manufacturera, por lo que se puede pensar en este proyecto aplicado a una verdadera empresa de producción. Los temas aquí relacionados, como el desorden en la línea de producción o los tiempos de proceso de los productos, son fundamentales en cualquier tipo de fábrica. En algunos casos uno de estos dos factores se convierte en primordial dependiendo del tipo de línea de fabricación con el que se cuente.

Por ejemplo en un sistema bajo pedido el tema de la secuenciación es un punto fundamental, dado que en esta técnica la primera orden en entrar debe ser la primera en salir. Si se presenta un desorden en las órdenes de producción esta regla no se cumplirá, lo que hará que los clientes no estén a gusto con el servicio prestado en dicha compañía, ningún cliente querrá que su pedido salga después de uno que llegó después de él. En este caso se escogerá la estructura de reproceso que sea capaz de disminuir en su mayor capacidad la entropía del sistema.

Como se presentó en la sección anterior la estructura de reproceso que tiene un grado de entropía casi nulo es la estructura ***E***, dado que esta hace uso del módulo de inventario. Lo que hace esta estructura es guardar todos y cada uno de los productos hasta que la orden esté completa, una vez completada la orden, entrega todos los productos en el orden con en el cual se enviaron, de esta manera se evita el desorden en la entrega de la orden de producción; el problema de esta estructura radica en que no es rentable para las empresas tener retenidos todos sus productos hasta que toda la orden de producción se encuentre completa. En este orden de ideas, la estructura que mejor se adapta es la ***B*** sabiendo que esta involucra un reproceso que genera menor entropía que las otras estructuras.

Por otro lado en un sistema de producción masiva donde el principal objetivo de las compañías es mantener altos niveles de inventario, el tema de la secuenciación queda un segundo plano, por ende su mayor prioridad serán los tiempos de producción. Bajo este escenario la implementación de una estructura de reproceso estará basada en su tiempo de procesamiento, de tal manera que las piezas a ser reparadas tarden el menor tiempo posible, para terminar con el proceso de producción. Con estas condiciones nuevamente la estructura B es la apta, esto dado que el grado en que aumenta los tiempos de producción son relativamente pequeños en comparación con las otras estructuras.

A continuación se presenta un esquema en el cual se establecen los aspectos que se deben tener en cuenta al momento de implementar una estructura de reproceso en una línea de producción.

Figura 50. Relación aspectos a tener en cuenta para implementación del reproceso

Fuente: Autoras (2017)

3 CONCLUSIONES

- La investigación teórica de este trabajo permitió visualizar diferentes investigaciones realizadas en torno al tema de los reprocesos en ambientes de producción. Los avances de los autores Yu & Efstathiou (2006) relacionados a estructuras de reprocesos en celdas de manufactura fueron desarrollados en la celda Has-200 a través de procesos de simulación.

- A pesar de que la celda de manufactura es un sistema altamente automatiza, presenta índices de productos defectuosos. Del total de productos procesados en la celda, el 6,1% de estos presentaron algún de tipo de error.

- Durante las corridas de producción fue posible identificar cuatro causas asociadas a la generación de productos defectuosos: indebido proceso de tapado, no despacho de los productos, averías en diferentes estaciones y productos desechados en las estaciones de calidad.

- A través de los procesos de simulación, en donde se realizó un planteamiento del funcionamiento de las estructuras de reproceso propuestas por Yu & Efstathiou (2006), fue posible medir factores como la entropía. De a acuerdo con los resultados obtenidos, la estructura de reproceso B, es la estructura que menos desorden genera en las corridas de producción. En comparación con las otras alternativas, esta genera en promedio 7.84% menos cambios de posición en los productos procesados en la máquina.

- La base para los procesos de simulación, está en el correcto levantamiento y posterior análisis de la información. Para poner en marcha el funcionamiento de la celda en Simio fue necesario realizar un estudio de tiempos a los procesos allí ejecutados. Con estos tiempos, fue posible calcular las distribuciones de probabilidad para determinar el comportamiento de los tiempos de proceso. Para el caso del desarrollo del proyecto, los procesos contaron con distribuciones de tipo triangular en la que se toma en cuenta factores como el mínimo, la media y el máximo de los datos.

- A través de análisis estadístico desarrollado pruebas de hipótesis fue posible validar el modelo preliminar de la celda realizado en Simio, con esto fue posible comprobar que los datos tomados y analizados de la celda se hicieron de forma correcta, dejando como resultado que lo simulado en el software es lo más parecido posible a la realidad del laboratorio, y con esto se puede tener en cuenta la implementación física de lo desarrollado en este documento

- El análisis de los requerimientos técnicos necesarios para la implementación de este sistema de reproceso en la celda de forma real, fueron planteados de forma muy general dado que no se cuenta con conocimientos relacionados a programación informática, robótica o ingeniería mecánica. De esta manera este aspecto podría ser un punto de partida para futuros proyectos investigativos, en los que se realicen planos de elaboración, componentes necesarios para su fabricación, dimensiones este nuevo módulo etc.

4 RECOMENDACIONES

- Diseñar un manual de funcionamiento interactivo en el que se explique de manera general la operatividad de la celda, logrando un impacto positivo en cualquier persona que lea y visualice la información allí plasmada. De esta manera se garantiza la familiarización con esta herramienta.

- De la mano con el anterior punto, se sugiere el diseño de prácticas en el que intervengan docentes de diferentes asignaturas a fin de que estas puedan ser aplicadas como complemento practico a las temáticas vistas en los salones de clase.

- Muchos docentes no hacen uso del laboratorio dado que no conocen plenamente su funcionamiento, por tanto se recomienda dar inducciones a todos los docentes que no tengan reconocimiento con esta herramienta, a fin de incentivarlos a llevar a sus estudiantes al laboratorio para ejecución de prácticas.

- Plantear diferentes ideas de posibles proyectos que puedan ser desarrollados haciendo uso de esta herramienta y divulgarlos ante los estudiantes, para que aquellos que se encuentren interesados cuenten con la oportunidad de desarrollar su proyecto de grado dentro de la universidad.

BIBLIOGRAFIA

- Alea, V. (1999). *Estadística aplicada a les ciències econòmiques i socials.* Barcelona: McGraw-Hill.
- Alfonso, K., & Aponte, S. (2013). Desarrollo de una herramienta computacional bajo algoritmos geneticos para la secuenciacion de ordenes de la celda de manufactura HAS-200 de la Universidad Libre Seccional Bogota. Bogotá: Universidad Libre .
- Bijari, M., Barzoki, M. R., & Jahanbazi, M. (2007). Effects of imperfect products and rework on lot sizing with work in process inventory. *IIE Annual Conference.Proceedings*, 919-925.
- Caballero, R., Fernandez, R., Jimenez, J., Olmo, M., & Oya, A. (s.f.). *Universidad de Jaen.* Recuperado el 22 de Octubre de 2017, de http://www4.ujaen.es/~mjolmo/EstadI/LADE_DCHO/Distribuciones.pdf
- Calle, D. (11 de Mayo de 2012). *Unicoos.* Recuperado el 5 de Noviembre de 2017, de https://www.youtube.com/watch?v=Kj9g-BC2YSg
- Chiu, Y., Chiang, K.-W., Chiu, S., & Song, M. (2016). Simultaneous determination of production and shipment decisions for a multi-product inventory system with a rework process. *Advances in Production Engineering & Management Journal, 11(2)*, 141-151.
- Felez, A. (Marzo de 2014). Modelización y simulación con SIMIO de procesos industriales y logísticos. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza .
- García, A., & Ortega, M. (Nociembre de 2006). Simulación de sistemas discretos. Madrid , España.
- Guerrero, I., & Briones, E. (22 de Enero de 2017). *Celdas de manufactura .* Obtenido de http://celdas-de-manufactura.es.tl/CELDAS--DE-MANUFACTURA.htm
- Gupta, J., & Schaller, J. (2006). Minimizing Flow Time in a Flow-Line Manufacturing Cell with Family Setup Times. *The Journal of the Operational Research Society Vol. 57*, 163-176.
- Hadjinicola, G. (2010). Manufacturing costs in serial production systems with rework. *The Journal of the Operational Research Society, 61(2)*, 242-251.
- Hwang, B.-G., & Yan, S. (2014). Rework and schedule performance, A profile of incidence, impact,causes and solutions. *Engineering, Construction and Architectural Management Vol. 21 No. 2*, 190-205.
- Lanham, G. (2007). The role of rework ain high controlled manufacturing operations . Carolina State University Domingues Hills .
- Levner, E., Kogan, K., & Maimon, O. (1995). Flowshop Scheduling of Robotic Cells with Job-Dependent Transportation and Set-Up Effects. *The Journal of the Operational Research Society, Vol. 46, No. 12*, 1447-1455.
- *Minitab INC*. (2016). Obtenido de http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/factorial-designs/factorial-designs/
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de experimentos.* Mexico: Limusa Wiley.
- *Portafolio .* (11 de Abril de 2013). Recuperado el 23 de Abril de 2017, de Colombia lidera procesos de automatización en la región: http://www.portafolio.co/negocios/empresas/colombia-lidera-procesos-automatizacion-region-68216#

- Salazar, B. (22 de Enero de 2017). *Ingenieria Industrial Online .* Obtenido de https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/producci%C3%B3n/sistema-de-produccion-flow-shop/
- TRAINING, S. I. (s.f.). *HAS 200 Sistema Altamente Automatizado .* Recuperado el 14 de Febrero de 2017, de http://tec-supply.com.mx/admin/emp/31/folletos/HAS-200.pdf
- Vallejo, B., & Vallejo, S. (2006). Aspectos generales de la automatizacion industrial en el sector farmaceutico . *Revista Colombiana de Ciencias Quimicas y Farmaceuticas, 35(1)*, 47-63.
- Yu, S., & Efstathiou, J. (2006). Complexity in rework cells: Theory, analysis and comparison. *The Journal of the Operational Research Society*, 593-602.